

ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

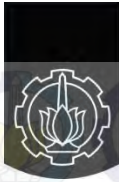
TUGAS AKHIR - TE 141599

RADAR MIMO-FMCW UNTUK DETEKSI TARGET JAMAK MENGGUNAKAN ALGORITMA MUSIC

Rahardika Nur Permana
NRP 2211 100 159

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***MIMO-FMCW RADAR FOR MULTIPLE TARGET
DETECTION WITH MUSIC ALGORITHM***

Rahardika Nur Permana
NRP 2211 100 159

Lecture Advisor
Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING MAJOR
Industry Technology Faculty
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

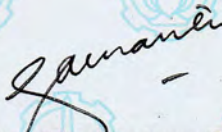
**RADAR MIMO-FMCW UNTUK DETEKSI TARGET JAMAK
MENGUNAKAN ALGORITMA MUSIC**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
pada
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing,



Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.
NIP. 197011111993031002



RADAR MIMO-FMCW UNTUK DETEKSI TARGET JAMAK MENGGUNAKAN ALGORITMA MUSIC

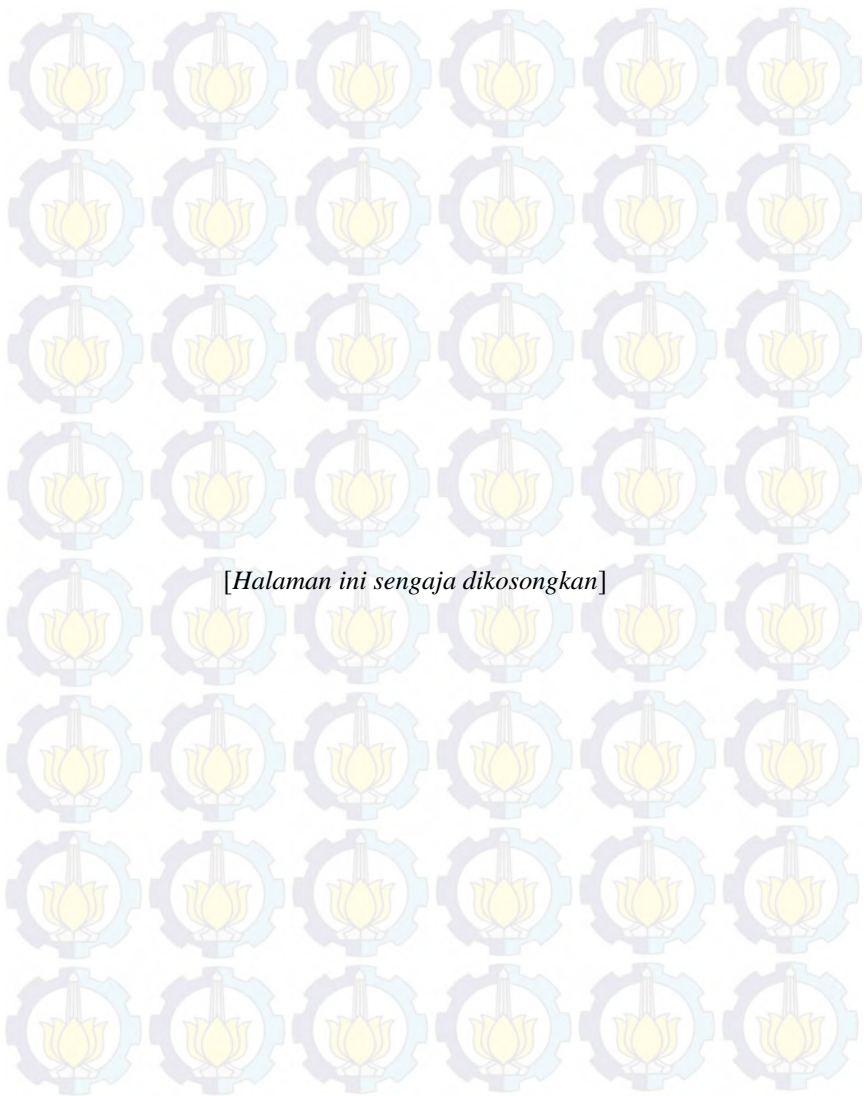
Rahardika Nur Permana
2211 100 159

Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.

Abstrak

Sistem radar menggunakan lebih dari satu antena pada sisi penerima secara umum mampu meningkatkan performa radar. Namun gagasan untuk menggunakan lebih dari satu antena pada sisi pemancar untuk mengirimkan sejumlah data masih sangat baru. Seperti pada teknologi *Multiple Input, Multiple Output* (MIMO) yang menggunakan lebih dari satu antena baik pada sisi pemancar maupun penerima. Teknologi MIMO telah sukses diaplikasikan untuk meningkatkan performa pada komunikasi *wireless*, dan kini akan dicoba untuk diaplikasikan pada sistem radar. Radar FMCW tidak memerlukan daya pancar yang besar untuk mendapatkan nilai SNR yang cukup untuk proses deteksi target, dari sisi hardware radar FMCW dapat dibangkitkan menggunakan *solid state amplifier* yang berukuran lebih kecil dan jauh lebih murah, dan radar FMCW sudah berhasil diterapkan untuk mengukur jarak dan kecepatan target bergerak. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan dan simulasi sistem radar MIMO-FMCW untuk mendapatkan informasi jarak dan DoA dari target. Dari hasil simulasi, radar MIMO-FMCW 4x4 menggunakan algoritma MUSIC mampu untuk mendeteksi sampai dengan 3 target, dengan jarak terdekat target yang bisa dideteksi radar adalah sejauh 2 m, dan jarak terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar adalah sejauh 871 m, resolusi jarak untuk deteksi 2 target yang berdekatan adalah sebesar 4 m, sedangkan resolusi jarak untuk deteksi 3 target sebesar 5 m, serta resolusi sudut untuk deteksi 2 target sebesar 2° , sedangkan resolusi sudut untuk deteksi 3 target sebesar 40° , rata-rata akurasi deteksi jarak sebesar 95.01%, dan rata-rata akurasi deteksi sudut sebesar 92.93% - 36.36% bergantung pada jumlah target yang dideteksi.

Kata kunci : Algoritma MUSIC, FMCW, MIMO, Korelasi Silang, Radar



MIMO-FMCW RADAR FOR MULTIPLE TARGET DETECTION WITH MUSIC ALGORITHM

Rahardika Nur Permana
2211 100 159

Advisor : Prof. Ir. Gamantyo Hendrantoro, M.Eng, Ph.D.

Abstract

Radar system using more than one receiver can improve radar performance, that idea known as array radar. But, there is no research using more than one antenna as transmitter until now. Example, *Multiple Input, Multiple Output* (MIMO). MIMO technology has been successfully applied to improve wireless communication performance. FMCW radar not require high transmit power for getting SNR value sufficient for the detection of targets. From the hardware side, FMCW radar can be generated using a smaller and cheaper solid state amplifier, and already successfully applied to measure the distance and velocity of moving targets. This final project is to design and to simulate MIMO-FMCW radar system to obtain information of target distance and DoA. The results is MIMO-FMCW radar with MUSIC Algorithm capable to detect object up to 3 targets, the shortest distance of targets can be detected radar is as far as 2m, and the farthest distance of targets detected by the radar is as far as 871m, the range resolution for 2 targets detection is 4m, while the 3 targets detection is 5m, and the angular resolution for 2 targets detection is 2° , while the 3 targets detection is 40° , range detection accuracy is 95.01%, and angular detection accuracy is 92.93% - 36.36%, depending on number of detection object.

Keyword : Cross Correlation, FMCW, MIMO, MUSIC Algorithm, Radar



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan buku tugas akhir dengan judul :

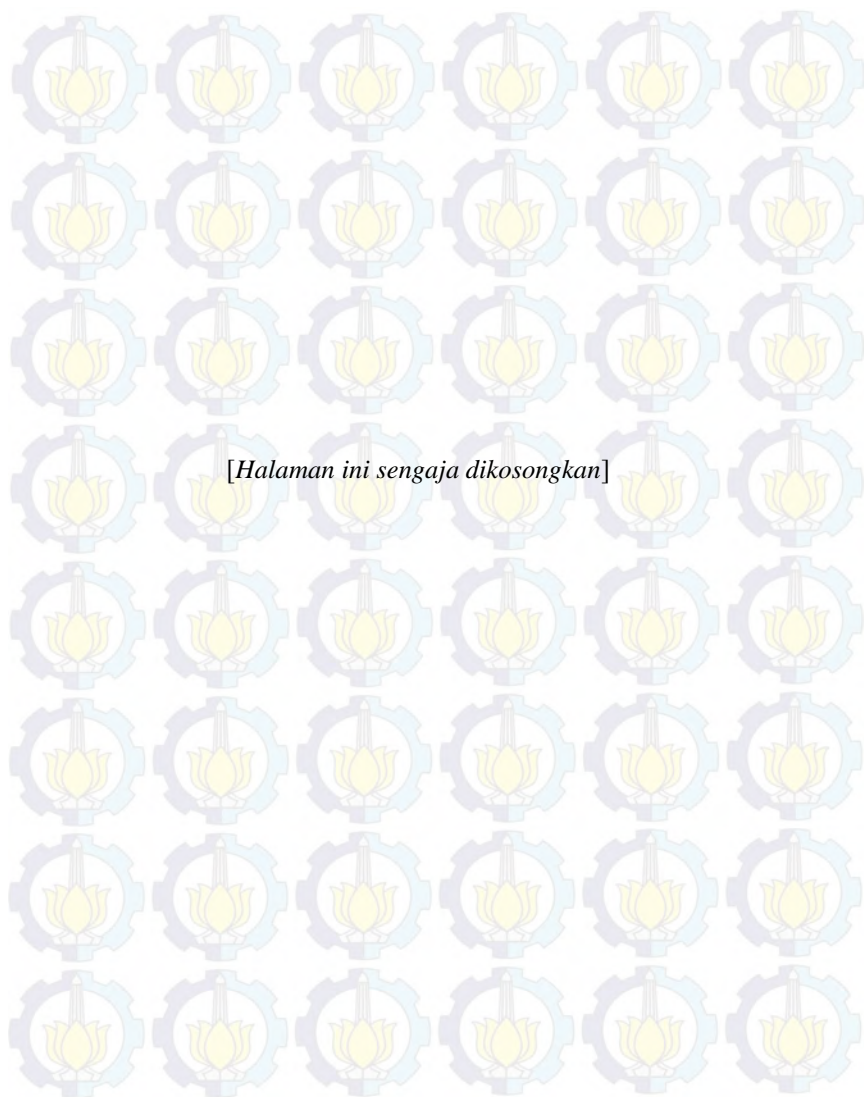
RADAR MIMO-FMCW UNTUK DETEKSI TARGET JAMAK MENGUNAKAN ALGORITMA MUSIC

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan, bimbingan, dan kerjasama dari berbagai pihak sehingga kendala tersebut dapat diatasi. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Papi, ibu, mba Feni, mba Ana, dan mba Lia, atas dukungan moril dan materiil yang selalu menguatkan penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
2. Ibu Devy Kuswidiastuti, S.T., M.Sc. dan Bapak Prof. Ir. Gamantyo Hendranto, M.Eng., Ph.D., selaku dosen pembimbing, atas bimbingan yang telah diberikan mulai dari awal penelitian hingga proses akhir penelitian.
3. Bapak dan Ibu dosen Telekomunikasi Multimedia, khususnya dosen Lab. Antena dan Propagasi, yang telah ikut membimbing penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
4. Rekan yang sangat membantu dalam penelitian ini, Radit, Tyo, mas Nurman, mba Tania, dan mba Ranita.
5. Rekan seperjuangan tugas akhir, Nazmi, Ayak, Oni, Hasrul, Candra, Vigor, atas kebersamaan dikala susah maupun senang.
6. Serta semua pihak yang telah membantu kelancaran pelaksanaan tugas akhir yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa pada penyusunan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan karena keterbatasan yang penulis miliki, walaupun demikian penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk penelitian kedepannya.

Surabaya, Januari 2016
Penulis



DAFTAR ISI

COVER	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Pembahasan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Sistem Radar [5]	7
2.1.1 Jarak Radar ke Target	7
2.1.2 <i>Maximum Unambiguous Range</i>	8
2.2 Gelombang Radar [5]	8
2.3 Sistem MIMO	9
2.4 Radar FMCW	11
2.4.1 Gelombang LFM [3]	12
2.4.2 Sistem Radar FMCW [8]	13
2.5 Radar MIMO [8]	14
2.6 Algoritma MUSIC [9]	15
2.7 Korelasi Silang [10]	16

2.7 Resolusi Radar [10]	17
2.8 Akurasi Deteksi [11]	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Spesifikasi Radar	22
3.2 Pembangkitan Sinyal	22
3.3 Pemodelan Target	26
3.4 Sisi Radar Penerima (<i>Receiver</i>)	30
3.5 Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target	32
3.5.1 Algoritma MUSIC	32
3.5.2 Korelasi Silang	32
3.6 Plot Hasil Deteksi Radar	34
3.7 Simulasi Radar MIMO-FMCW menggunakan Perangkat Lunak MATLAB	35
3.7.1 Spesifikasi Radar	35
3.7.2 Pembangkitan Sinyal	36
3.7.3 Pemodelan Target	36
3.7.4 Sisi Radar Penerima (<i>Receiver</i>)	37
3.7.5 Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target	37
3.7.6 Plot Hasil Deteksi Radar	37
3.8 Skenario Simulasi Pengujian Kinerja Radar MIMO-FMCW	38
3.8.1 Deteksi 1 Target	39
3.8.2 Deteksi 2 Target	39
3.8.3 Deteksi 3 Target	40
3.8.4 Deteksi 4 Target	40
BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR MIMO- FMCW	43
4.1 Analisis Deteksi 1 Target	43
4.2 Analisis Deteksi 2 Target	48
4.3 Analisis Deteksi 3 Target	51

4.5 Analisis Deteksi 4 Target	53
4.6 Sintesis	55
BAB 5 PENUTUP.....	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN A PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR	61
LAMPIRAN B <i>SCRIPT</i> SIMULASI PADA PERANGKAT LUNAK MATLAB.....	63
LAMPIRAN C PLOT HASIL SIMULASI 1 TARGET	71
LAMPIRAN D PLOT HASIL SIMULASI 2 TARGET	85
LAMPIRAN E PLOT HASIL SIMULASI 3 TARGET	87
LAMPIRAN F PLOT HASIL SIMULASI 4 TARGET.....	89
BIODATA PENULIS	91



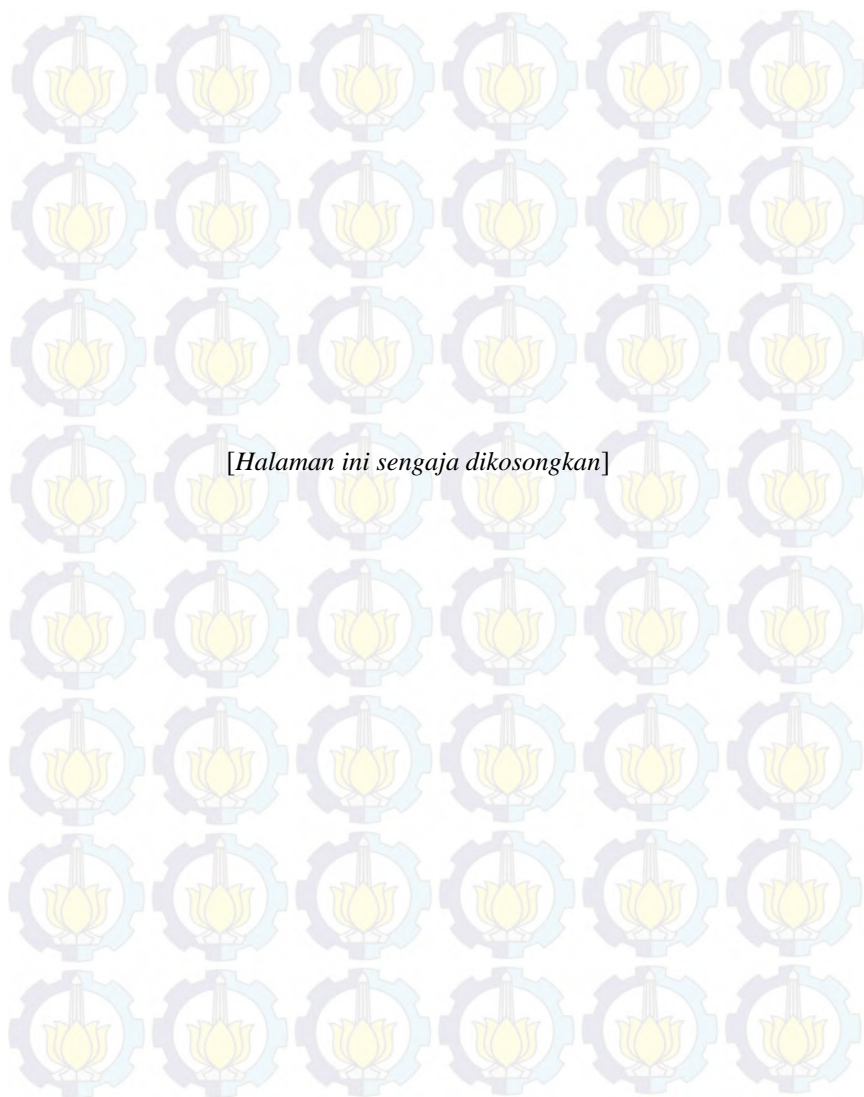
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Automotive Vehicle [1]	1
Gambar 2.1 Sistem Radar [5]	7
Gambar 2.2 Gelombang Pulsa [5]	9
Gambar 2.3 Kanal MIMO [6]	10
Gambar 2.4 Sinyal Gigi Gergaji pada FMCW [7]	11
Gambar 2.5 Sinyal <i>Beat</i> Hasil Pantulan oleh Objek [7]	12
Gambar 2.6 Gelombang LFM, up-chirp (kiri) down-chirp (kanan) [3].	13
Gambar 2.7 Blok Diagram Sistem Radar FMCW [8]	14
Gambar 2.8 Pemodelan Radar MIMO [8]	15
Gambar 3.1 Diagram Blok Simulasi Sistem Radar MIMO-FMCW	21
Gambar 3.2 Diagram Blok Pembangkitan Sinyal LFM	23
Gambar 3.3 Sinyal <i>Cosinus Up-Chirp</i> (atas) dan <i>Down-Chirp</i> (bawah)	24
Gambar 3.4 Sinyal <i>Sinus Up-Chirp</i> (atas) dan <i>Down-Chirp</i> (bawah) ...	25
Gambar 3.5 Sinyal Hasil Penjumlahan 4 Pemancar	26
Gambar 3.6 Ilustrasi Jarak yang Ditempuh oleh Sinyal yang Dipancarkan Radar hingga kembali diterima Radar	26
Gambar 3.7 Sinyal dengan <i>Delay</i> untuk Jarak 100 m	28
Gambar 3.8 Sinyal dengan <i>Delay</i> untuk Jarak 200 m	28
Gambar 3.9 Diagram Blok Proses <i>Steering Vector</i>	29
Gambar 3.10 Sinyal yang mengandung <i>Steering Vector</i> dan <i>Delay</i>	30
Gambar 3.11 Diagram Blok pada Sisi Radar Penerima	31
Gambar 3.12 Sinyal Hasil Pemodelan Kanal untuk SNR 20 dB	31
Gambar 3.13 Diagram Blok Pengolahan Sinyal Menggunakan Algoritma MUSIC	32
Gambar 3.14 Hasil Pengolahan Sinyal menggunakan Algoritma MUSIC	33
Gambar 3.15 Diagram Blok Pengolahan Sinyal menggunakan Korelasi Silang	33
Gambar 3.16 Hasil Pengolahan Sinyal menggunakan Korelasi Silang.	34
Gambar 3.17 Plot Hasil Pengolahan Sinyal untuk Informasi Jarak dan DoA	35



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Radar MIMO-FMCW yang Diinginkan	22
Tabel 4.1 Hasil Simulasi Deteksi 1 Target pada Jarak 100 m dan DoA dari 0° hingga 180° untuk DoA setiap 10° (SNR = 20 dB).....	43
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Deteksi 1 Target pada DoA 70° dan jarak 0-900 m untuk jarak setiap 50 m (SNR 20 dB)	44
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Jarak Terdekat Target dari Radar (SNR = 20 dB).....	45
Tabel 4.4 Hasil Simulasi Jarak Terjauh Target dari Radar (SNR = 20 dB).....	45
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 1 Target (DoA).....	47
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 1 Target (Jarak)	47
Tabel 4.7 Hasil Simulasi Deteksi 2 Target (SNR = 20 dB).....	48
Tabel 4.8 Hasil Simulasi Resolusi Jarak Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB).....	49
Tabel 4.9 Hasil Simulasi Resolusi Sudut Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB).....	50
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 2 Target (DoA).....	50
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 2 Target (jarak)	50
Tabel 4.12 Hasil Simulasi Deteksi 3 Target.....	51
Tabel 4.13 Hasil Simulasi Resolusi Jarak Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB).....	52
Tabel 4.14 Hasil Simulasi Resolusi Sudut Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB).....	52
Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 3 Target (DoA).....	53
Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 3 Target (jarak)	53
Tabel 4.17 Hasil Simulasi Deteksi 4 Target.....	53
Tabel 4.18 Hasil Simulasi Resolusi Jarak Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB).....	54
Tabel 4.19 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 4 Target (jarak)	55



BAB 1

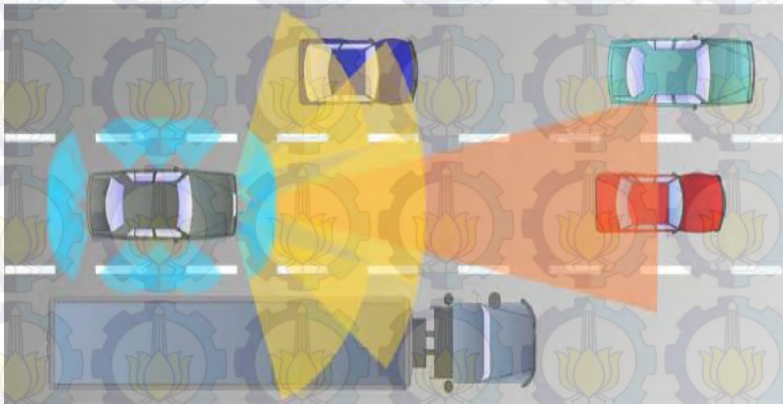
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tingginya angka kecelakaan kendaraan bermotor di jalan raya disebabkan oleh banyak faktor, antara lain faktor manusia dan faktor kendaraan bermotor itu sendiri (*sumber : Badan Pusat Statistik*). Kelalaian manusia dalam mengemudikan kendaraan bermotor serta sistem pengoperasian kendaraan bermotor yang masih dikontrol oleh manusia membuat resiko kecelakaan tetap tinggi. Maka perlu adanya solusi untuk mengurangi resiko tersebut, salah satunya dengan menambahkan sistem radar pada kendaraan bermotor.

Sistem radar yang ditambahkan pada kendaraan bermotor bertujuan agar kendaraan bermotor mampu melakukan deteksi jarak, kecepatan, dan arah kedatangan dari kendaraan bermotor lain. Sehingga kendaraan bermotor diharapkan mampu melakukan respon secara otomatis untuk menghindari kejadian yang tidak diinginkan seperti kecelakaan lalu lintas.

Pengoperasian kendaraan bermotor yang tidak hanya dikendalikan oleh manusia, namun juga mampu untuk menjalankan suatu sistem secara otomatis dinamakan sebagai *Automotive Vehicle* [1]. Ilustrasi *Automotive Vehicle* dapat dilihat pada **Gambar 1.1**



Gambar 1.1 Automotive Vehicle [1]

Banyak teknologi yang bisa digunakan dalam sistem radar. Pada tugas akhir ini penulis memilih menggunakan sistem *Multiple Input, Multiple Output* (MIMO) – *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCW).

Sistem MIMO dengan antenna yang terletak pada satu tempat dengan posisi linier (*colocated antenna*) untuk sistem radar memiliki sejumlah keunggulan, yaitu kemampuan untuk menghasilkan resolusi yang tinggi, akurasi untuk mendeteksi target bergerak pelan yang tinggi, dan identifikasi parameter yang lebih mudah bila dibandingkan dengan radar *phased array* [2].

Gelombang LFM (*Linear Frequency Modulation*) adalah gelombang yang dibangkitkan sepanjang lebar pulsa tertentu secara satu arah baik naik (*up-chirp*) maupun turun (*down-chirp*). Gelombang ini cocok digunakan pada sistem MIMO karena tingkat orthogonalitas antar sinyalnya yang baik [3].

Sedangkan radar FMCW tidak memerlukan daya pancar yang besar untuk mendapatkan nilai SNR yang cukup untuk proses deteksi target, dari sisi hardware radar FMCW dapat dibangkitkan menggunakan *solid state amplifier* yang berukuran lebih kecil dan jauh lebih murah, dan radar FMCW sudah berhasil diterapkan untuk mengukur jarak dan kecepatan target bergerak [4].

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan dan simulasi sistem radar MIMO-FMCW. Kemudian dilakukan analisis kemampuan radar MIMO-FMCW untuk mendapatkan jarak dan arah kedatangan (*Direction of Arrival/DoA*) dari target, serta menganalisis resolusi jarak, jarak terdekat dan terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar, resolusi sudut, dan akurasi deteksi dari radar tersebut.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana desain pembangkitan sinyal, konfigurasi pemancar dan penerima, serta pengolahan sinyal pada sistem radar MIMO-FMCW?
2. Apakah radar MIMO-FMCW mampu mendapatkan jarak dan arah kedatangan dari target?
3. Berapa resolusi jarak, jarak terdekat dan terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar, resolusi sudut, dan akurasi deteksi dari radar MIMO-FMCW?

1.3 Batasan Masalah

Hal-hal yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Parameter yang akan dianalisis dari radar MIMO-FMCW adalah jarak, arah kedatangan, resolusi jarak, jarak terdekat dan terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar, resolusi sudut, dan akurasi deteksi
2. Sistem radar MIMO-FMCW yang dibangun tidak mendeteksi kecepatan target
3. Menggunakan konfigurasi MIMO 4x4
4. Simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB R2014b
5. Spesifikasi perangkat keras yang dijadikan referensi adalah NI USRP tipe N210/2922

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

1. Membuat desain pembangkitan sinyal, konfigurasi pemancar dan penerima, serta pengolahan sinyal pada sistem radar MIMO-FMCW dan mensimulasikannya
2. Menganalisis kemampuan radar MIMO-FMCW dalam mendapatkan jarak dan arah kedatangan dari target
3. Menganalisis resolusi jarak, jarak terdekat dan terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar, dan akurasi deteksi dari radar MIMO-FMCW

1.5 Metodologi

Metode penelitian dilakukan dengan lima tahap yaitu studi literatur, perancangan sistem radar MIMO-FMCW, pengujian dengan simulasi, pengolahan data hasil simulasi, analisis data dan penarikan kesimpulan dari penelitian

Studi literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari dan mempelajari beberapa paper dan jurnal baik skala nasional maupun internasional serta beberapa buku literatur yang sesuai dengan topik tugas akhir yang diambil. Pada tahap ini akan dipelajari sistem radar, sistem MIMO, gelombang FMCW, radar MIMO, radar FMCW, dan algoritma MUSIC.

Perancangan Sistem Radar MIMO-FMCW

Pada tahap ini akan diterapkan simulasi radar MIMO-FMCW menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dalam tahap ini penulis

menentukan spesifikasi sistem radar, pembangkitan sinyal, pemodelan target, pengolahan sinyal hasil deteksi target, dan skenario simulasi.

Pengujian Skenario Simulasi

Pada tahap ini dilakukan pengujian sistem radar yang telah dirancang dengan skenario yang ditetapkan. Skenario yang dibuat yaitu deteksi target bergerak jamak untuk didapatkan informasi jarak dan sudut kedatangan (DoA) dari target. Pengujian dilakukan dengan simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Pengolahan Data Hasil Simulasi

Pada tahap ini dilakukan pengolahan data berdasarkan hasil yang didapat dari simulasi sistem radar yang telah dibangun dan dengan skenario yang telah ditetapkan.

Analisis Data dan Penarikan Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan pengamatan dan analisis terhadap data yang telah diperoleh, beserta penarikan kesimpulan berdasarkan analisis data yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Pembahasan

Laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut.

- BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika laporan, dan relevansi.

- BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan tentang tinjauan pustaka yang akan membahas tentang sistem radar, sistem MIMO, gelombang FMCW, radar MIMO, radar FMCW, dan algoritma MUSIC.

- BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan tentang metodologi penelitian dalam merancang sistem radar MIMO-FMCW berdasarkan teori pada Bab 2.

- BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR MIMO-FMCW

Pada bab ini akan ditampilkan hasil pengujian berdasarkan simulasi sistem radar MIMO-FMCW dengan skenario yang ditetapkan, kemudian dilakukan analisis dari data yang telah diperoleh sehingga dapat memudahkan melakukan penarikan kesimpulan.

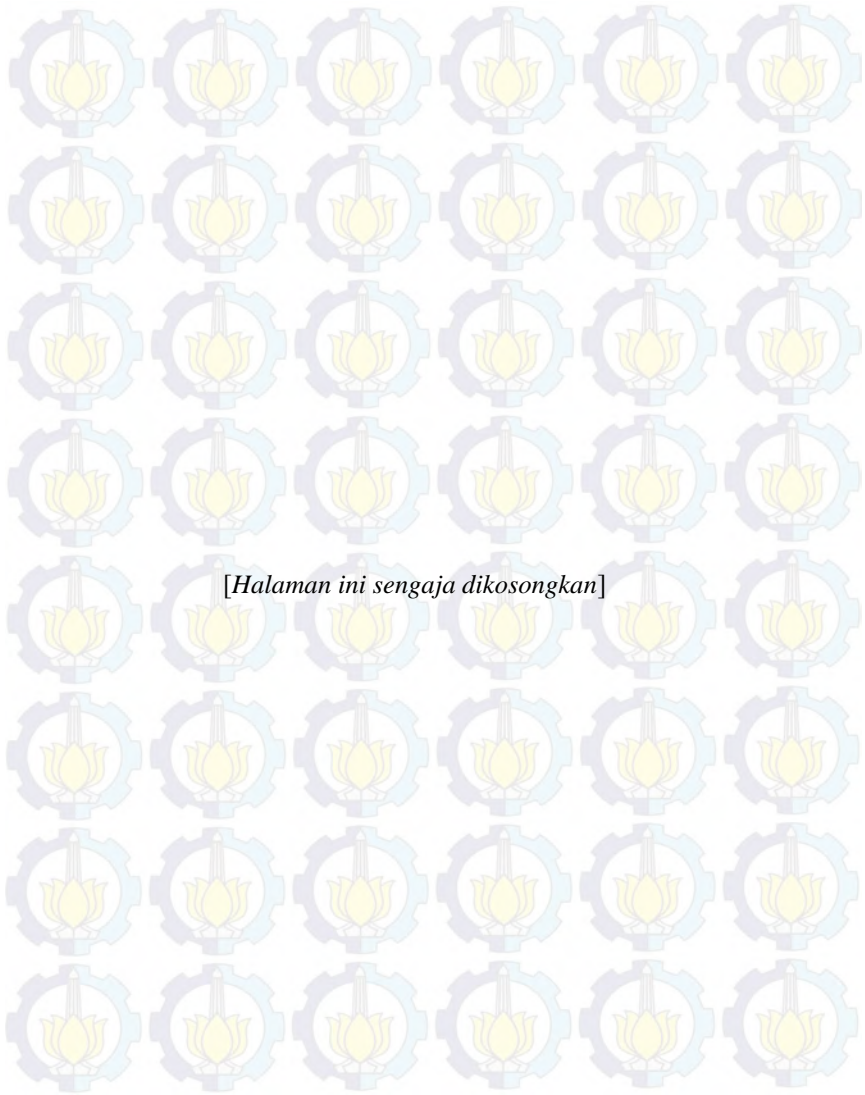
- **BAB 5 PENUTUP**

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran berdasarkan yang telah dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Hasil yang didapat dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan kontribusi berupa sistem radar baru yang dapat mendapatkan jarak dan sudut kedatangan target dengan resolusi yang baik.
2. Menjadi referensi dalam pengimplementasian radar MIMO-FMCW menggunakan perangkat keras.

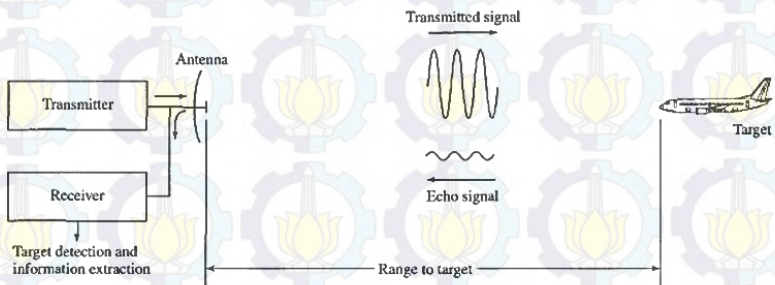


BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Radar [5]

Radio detection and ranging (Radar) adalah sistem elektromagnetik untuk mendeteksi dan mendapatkan informasi lokasi target pantulan seperti pesawat terbang, kapal, kendaraan bermotor, manusia, dan atau lingkungan sekitar. Radar dioperasikan dengan meradiasikan gelombang elektromagnetik ke udara lalu mendeteksi sinyal *echo* yang diterima dari pantulan target. Sinyal pantulan yang diterima oleh radar tidak hanya menunjukkan adanya target, namun dengan membandingkan sinyal *echo* yang diterima dengan sinyal yang ditransmisikan, lokasi dari target dapat ditentukan bersamaan dengan informasi lain dari target tersebut. Radar dapat dioperasikan baik pada jarak dekat maupun jauh dan dibawah kondisi seperti kegelapan, mendung, hujan, maupun bersalju. Kemampuan untuk mengukur jarak dengan akurasi tinggi dan dapat dioperasikan di segala cuaca menjadi keunggulan utama radar. Prinsip dasar sistem radar dapat dilihat melalui **Gambar 2.1**



Gambar 2.1 Sistem Radar [5]

Jarak radar ke target dapat ditentukan dengan menghitung waktu ketika sinyal tepat ditransmisikan ke target dan ketika kembali ke radar. Sedangkan lokasi dari target dalam sudut dapat ditentukan dari arah *narrow-beamwidth* antenna radar ketika menerima sinyal *echo* pada amplitudo maksimum.

2.1.1 Jarak Radar ke Target

Jarak radar ke target ditentukan dengan waktu T_R radar untuk mentransmisikan sinyal ke target dan kembali ke radar. Kecepatan

cahaya $c = 3 \times 10^8$ m/s. Jarak radar ke target R dapat dilihat pada persamaan (2.1)

$$R = \frac{cT_R}{2} \quad (2.1)$$

dimana R dalam satuan meter.

2.1.2 Maximum Unambiguous Range

Maximum Unambiguous Range adalah jarak yang bisa ditempuh sinyal sebelum sinyal berikutnya ditransmisikan. Jarak ini dihitung karena jika ada dua sinyal atau lebih di *space area* akan menimbulkan ambiguitas sinyal ketika sampai di antena penerima, sehingga hasil deteksi maupun pengukuran oleh radar bisa salah. *Maximum Unambiguous Range* (R_{un}) bisa dihitung melalui persamaan (2.2)

$$R_{un} = \frac{cT_p}{2} = \frac{c}{2f_p} \quad (2.2)$$

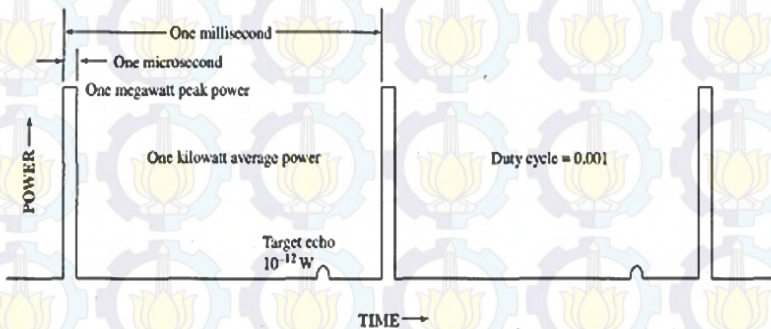
dimana T_p adalah *pulse repetition period* dan $T_p = 1/f_p$.

Selain untuk mencegah ambiguitas sinyal, *Maximum Unambiguous Range* juga menunjukkan jarak maksimum target yang dapat dideteksi oleh radar.

2.2 Gelombang Radar [5]

Deretan pulsa yang sangat panjang diperlukan untuk mendeteksi target yang kecil pada jarak yang jauh. Namun deretan pulsa yang panjang ini, pada dasarnya, memiliki resolusi yang rendah pada dimensi jarak. Modulasi frekuensi atau modulasi fase dapat digunakan untuk meningkatkan lebar spektral pada deretan pulsa yang panjang untuk mendapatkan kualitas resolusi yang tinggi seperti ketika menggunakan deretan pulsa yang pendek, atau disebut juga sebagai *pulse compression*. Gelombang pulsa radar dapat dilihat pada **Gambar 2.2**. Contohnya adalah *continous wave* (CW), yang juga telah digunakan pada sistem radar. Radar CW dipengaruhi oleh frekuensi doppler dari sinyal *echo*, yang disebabkan oleh target bergerak. Radar CW sederhana tidak digunakan untuk mengukur jarak. Namun sebenarnya radar ini mampu mengukur jarak, dengan memodulasi *carrier* menggunakan teknik modulasi frekuensi atau fase.

Contoh lainnya adalah radar FM-CW yang merupakan gabungan dari radar CW dan penggunaan teknik modulasi frekuensi. Radar ini biasa digunakan pada altimeter radar yang berfungsi untuk mengukur ketinggian (*altitude*) pesawat terbang dari permukaan bumi. Penggunaan frekuensi doppler adalah untuk mencegah sinyal *echo* yang tidak diinginkan ketika mendeteksi target bergerak, dengan menaikkan nilai *duty cycle* dan nilai *pulse repetition frequency*.



Gambar 2.2 Gelombang Pulsa [5]

2.3 Sistem MIMO

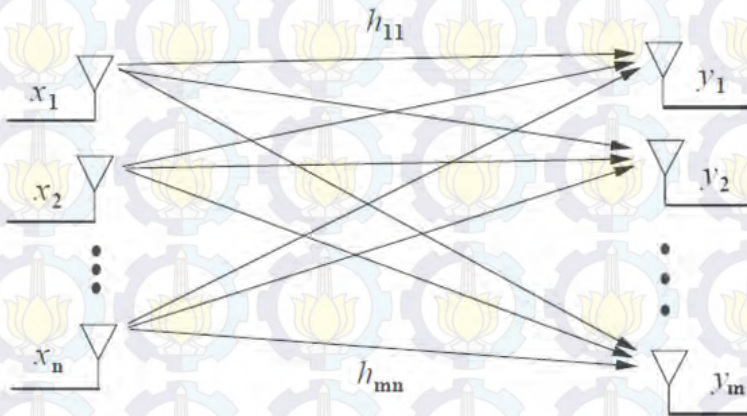
Sistem MIMO didefinisikan sebagai komunikasi *point-to-point* menggunakan banyak antena baik pada pemancar maupun penerima. Manfaat penggunaan banyak antena pada kedua sisi ini adalah untuk meningkatkan performa melalui sistem diversitas yang digunakan. Secara khusus, penelitian terakhir yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem MIMO dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan data pada sistem *wireless* tanpa meningkatkan daya pengiriman maupun *bandwidth*. Dampak dari meningkatnya kecepatan data ini adalah alokasi ruang tambahan dan tata letak untuk penempatan antena-antena serta parameter sistem yang lebih kompleks untuk pemrosesan sinyal multi-dimensi. Sistem komunikasi *point-to-point* pita sempit (*narrowband*) menggunakan n antena pemancar dan m antena penerima digambarkan dengan model waktu diskrit pada matriks di persamaan (2.3) [6]

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & \cdots & h_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_m \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

atau secara sederhana dapat ditulis pada persamaan (2.4)

$$\bar{y} = H\bar{x} + \bar{N} \quad (2.4)$$

dimana \bar{x} adalah *n-dimensional transmitted symbol*, \bar{N} adalah vektor *Additional White Gaussian Noise (AWGN)* yang besarnya *m-dimensi*, dan matriks kanal H adalah *zero mean (Rayleigh Fading) complex circular Gaussian random* dimana variabel h_{ij} merepresentasikan *gain kanal* dari antenna pemancar j ke antenna penerima i . Dengan asumsi melakukan normalisasi *noise* sehingga *noise covariance matrix* adalah sebuah matriks identitas, serta diasumsikan sisi penerima mampu untuk melakukan estimasi pada kanal H secara tepat, sehingga setiap elemen H dapat diidentifikasi. Dan sebagai catatan tambahan bahwa semua variabel diatas adalah proses stokastik. Sistem kanal MIMO dapat dilihat pada **Gambar 2.3** [6].

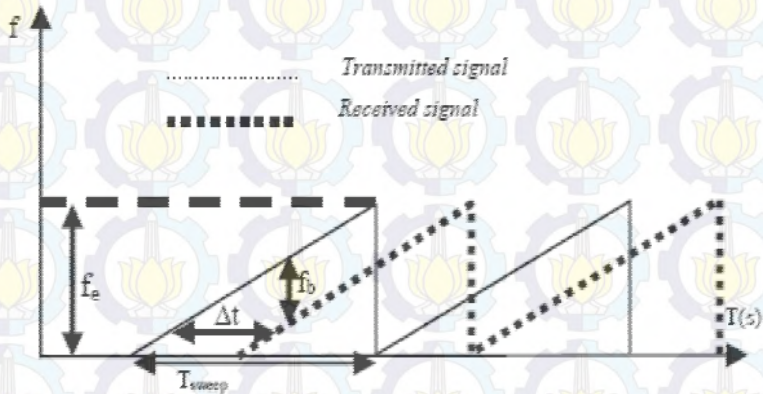


Gambar 2.3 Kanal MIMO [6]

Sistem MIMO dengan antenna yang terletak pada satu tempat dengan posisi linier (*colocated antenna*) untuk sistem radar memiliki sejumlah keunggulan, yaitu kemampuan untuk menghasilkan resolusi yang tinggi, akurasi untuk mendeteksi target bergerak pelan yang tinggi, dan identifikasi parameter yang lebih mudah bila dibandingkan dengan radar *phased array* [2].

2.4 Radar FMCW

Radar FMCW atau *Frequency Modulated Continuous Wave* adalah suatu sistem radar dimana gelombang radio dengan frekuensi yang kontinu dan stabil dimodulasikan dengan sinyal segitiga sehingga akan terjadi variasi frekuensi, kemudian dimodulasikan dengan sinyal gigi gergaji untuk mendapatkan nilai jarak dan kecepatan objek. Bentuk sinyal transmisi FMCW dalam bentuk sinyal gigi gergaji sesuai pada **Gambar 2.4** [7]



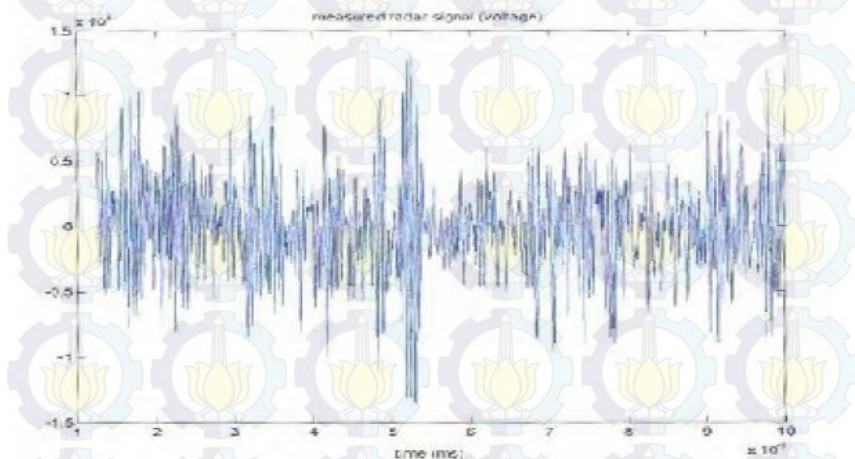
Gambar 2.4 Sinyal Gigi Gergaji pada FMCW [7]

dimana f_e adalah frekuensi ekskursor, f_b adalah frekuensi *beat* (Δf) dan T_{sweep} adalah *sweep time*. Setelah sinyal transmisi tersebut mengenai suatu objek, maka sinyal hasil pantulannya akan didapatkan seperti **Gambar 2.5**. Sinyal tersebut dinyatakan dalam persamaan (2.5) [7]

$$\cos(2\pi ft) \times \cos(2\pi(f + f_b)t) \quad (2.5)$$

dimana f adalah frekuensi sinyal transmisi, f_b adalah frekuensi *beat*, dan komponen \cos adalah sinyal yang diterima dan sinyal transmisi. Nantinya, dengan menggunakan *lowpass filter*, komponen yang mengandung frekuensi tinggi dapat dihilangkan, sehingga tersisa komponen $\cos(2\pi f_b t)$. Komponen ini berkaitan dengan waktu tunda (*delay*) antara sinyal transmisi dan sinyal yang diterima, sehingga juga berhubungan dengan objek atau target yang terdeteksi (R) [7].

Keunggulannya adalah radar FMCW tidak memerlukan daya pancar yang besar untuk mendapatkan nilai SNR yang cukup untuk proses deteksi target, dari sisi hardware radar FMCW dapat dibangkitkan menggunakan *solid state amplifier* yang berukuran lebih kecil dan jauh lebih murah, dan radar FMCW sudah berhasil diterapkan untuk mengukur jarak dan kecepatan target bergerak [4].



Gambar 2.5 Sinyal *Beat* Hasil Pantulan oleh Objek [7]

2.4.1 Gelombang LFM [3]

Gelombang LFM (*Linear Frequency Modulation*) adalah gelombang yang dibangkitkan sepanjang lebar pulsa tertentu secara satu arah baik naik (*up-chirp*) maupun turun (*down-chirp*). Persamaan sinyal *up-chirp* dan *down-chirp* yang dipancarkan dapat dilihat pada persamaan (2.6) dan (2.7)

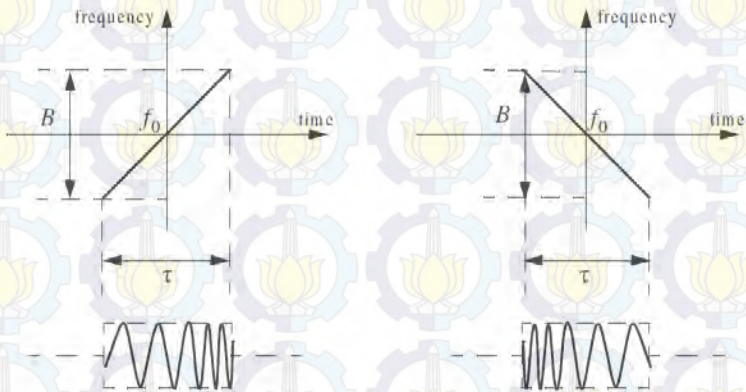
$$s(t) = A \cos(2\pi f t + (\mu/2\tau) ((t - \tau)^2)) \quad (2.6)$$

$$s(t) = A \cos(2\pi f t - (\mu/2\tau) ((t - \tau)^2)) \quad (2.7)$$

persamaan (2.6) merupakan persamaan sinyal LFM *up-chirp* dan persamaan (2.7) merupakan persamaan sinyal LFM *down-chirp*. A adalah amplitudo sinyal *chirp* yang dipancarkan, A ditentukan sebesar 1, f adalah frekuensi tengah sinyal *chirp*, τ merupakan periode sinyal *chirp*, dan μ merupakan laju perubahan frekuensi. μ dapat diperoleh melalui persamaan (2.8)

$$\mu = 2\pi B \quad (2.8)$$

B adalah *bandwidth*. Plot perubahan frekuensi terhadap waktu untuk sinyal *up-chirp* dan *down-chirp* dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.

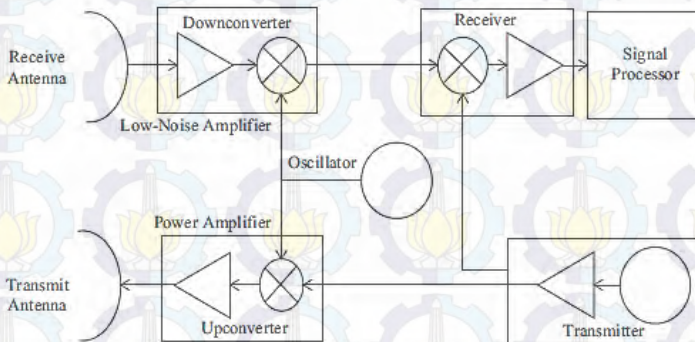


Gambar 2.6 Gelombang LFM, up-chirp (kiri) down-chirp (kanan) [3]

2.4.2 Sistem Radar FMCW [8]

Sesuai pada **Gambar 2.7**, *transmitter* memancarkan gelombang pada *Intermediate Frequency* (IF). Kemudian dikalikan dengan *local oscillator* untuk menumpangkan sinyal informasi dengan sinyal *carrier*.

Sinyal yang diterima radar juga dikalikan dengan *local oscillator*, dan pemrosesan sinyal dilakukan pada IF. Keuntungan pada sistem tersebut adalah daya dari sinyal yang dipancarkan dapat diperkecil karena terpisahnya *carrier* tersebut. Adanya filter juga memperkecil efek dari adanya *noise* yang diterima sinyal.



Gambar 2.7 Blok Diagram Sistem Radar FMCW [8]

2.5 Radar MIMO [8]

Radar MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) mempunyai karakteristik yaitu kemampuannya untuk mengirimkan sinyal yang saling independen dari banyak elemen pemancar yang memiliki diversitas spasial dan untuk mengamati sinyal yang diterima pada elemen penerima yang juga memiliki diversitas spasial. Operasi dari radar MIMO diilustrasikan pada **Gambar 2.8**.

Untuk radar dengan banyak elemen pemancar, maka sinyal yang ditransmisikan oleh pemancar harus saling orthogonal. Dua sinyal dikatakan saling orthogonal jika memenuhi persamaan (2.9)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(t) \varphi_2^*(t) dt = 0 \quad (2.9)$$

Ada tiga teknik untuk memaksimalkan orthogonalitas antar sinyal yang dikirimkan pemancar pada radar MIMO, yaitu dengan memanfaatkan waktu pancar (*Time Division Multiplexing*), frekuensi

sinyal (*Frequency Division Multiplexing*), dan/atau teknik pengkodean (*Code Division Multiplexing*).

Dengan radar MIMO, keuntungan yang didapatkan adalah kapasitas bandwidth yang semakin besar, resolusi radar yang semakin baik, dan kerja radar tetap maksimum ketika salah satu pemancar atau penerima mengalami kerusakan/*error*.



Gambar 2.8 Pemodelan Radar MIMO [8]

2.6 Algoritma MUSIC [9]

MUSIC merupakan akronim dari *Multiple Signal Classification* yang pertama kali diperkenalkan oleh Schmidt dan dikenal sebagai metode *eigenstructure* dengan resolusi yang tinggi. MUSIC dapat digunakan untuk mendapatkan informasi jumlah sinyal yang diterima, *Direction of Arrival* (DoA) atau sudut kedatangan, dan besarnya daya sinyal yang diterima.

Pada algoritma MUSIC, sinyal yang diterima didapatkan dari nilai *eigenvalue* dan *eigenvector*. Jumlah sinyal disimbolkan dengan huruf D , jumlah *eigenvalue* dan *eigenvector* sinyal adalah D , dan *eigenvalue* dan *eigenvector noise* adalah $M-D$, dimana M adalah jumlah dari elemen array di sisi penerima. Karena algoritma MUSIC juga menggunakan *eigenvector noise subspace*, maka metode ini juga dikenal dengan nama metode *subspace*.

Dalam algoritma MUSIC, langkah pertama adalah menentukan matriks kovarian dari sinyal yang diterima (\bar{R}_{xx}), yang didapatkan melalui persamaan (2.10)

$$\bar{R}_{xx} = \bar{A} \bar{A}^H \quad (2.10)$$

dimana \bar{A} adalah sinyal yang diterima.

Tahap berikutnya adalah membangkitkan fase acak yang menyatakan hamburan acak dari target. Fase acak ini terdistribusi *random uniform*. Fase acak ditulis pada persamaan (2.11)

$$f_{\text{fase acak}} = Ae^{j\varphi}, \quad f_{\text{fase acak}} \sim u \quad (2.11)$$

dimana $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ dan A adalah amplitudo.

Kemudian menentukan *eigenvector noise subspace* \bar{E}_N yang memiliki ukuran $M \times (M - D)$. *Eigenvector noise subspace* \bar{E}_N dapat diperoleh melalui persamaan (2.12)

$$\bar{E}_N = [\bar{e}_1 \quad \bar{e}_2 \quad \dots \quad \bar{e}_{M-D}] \quad (2.12)$$

Maka didapatkan estimasi DoA dengan algoritma MUSIC ($P_{MU}(\theta)$) menggunakan rumus pada persamaan (2.13)

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{|\bar{a}(\theta)^H \bar{E}_N \bar{E}_N^H \bar{a}(\theta)|} \quad (2.13)$$

dimana $\bar{a}(\theta)$ merupakan *array steering vector*. $\bar{a}(\theta)$ dapat dihitung dengan rumus pada persamaan (2.14)

$$\bar{a}(\theta) = [1 \quad e^{j(kd \sin\theta + \delta)} \quad \dots \quad e^{j(N-1)(kd \sin\theta + \delta)}]^T \quad (2.14)$$

dimana d adalah spasi antar elemen penerima, dan δ adalah beda fase antar elemen.

2.7 Korelasi Silang [10]

Korelasi silang deterministik antara dua sinyal $x[n]$ dan $y[n]$ didefinisikan dalam persamaan (2.15)

$$c_{xx}[m] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] y^*[n + m] \quad (2.15)$$

dimana m disebut sebagai *correlation lag*. Jika $x[n] = y[n]$, maka $c_{xx}[m]$ disebut sebagai autokorelasi deterministik dari $x[n]$. Persamaan $c_{xx}[m]$ ketika $m = 0$ dapat dilihat dalam persamaan (2.16)

$$c_{xx}[0] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]x^*[n] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x[n]|^2 = E_x \quad (2.16)$$

dimana E_x adalah energi dari sinyal $x[n]$. Ketika $m = 0$, maka m atau *lag* adalah titik puncak dari fungsi autokorelasi, dalam persamaan (2.17)

$$c_{xx}[m] \leq c_{xx}[0] \quad (2.17)$$

namun sifat tersebut tidak berlaku untuk fungsi korelasi silang antara dua sinyal yang berbeda.

Korelasi digunakan pada pemrosesan sinyal untuk mendeteksi sinyal informasi pada *noise* tertinggi dan untuk estimasi isi dari sinyal informasi pada deretan *noise*. Sebagai contoh, ketika puncak nilai *lag* ($m = 0$) pada posisi 10, maka informasi tersebut mengindikasikan adanya korelasi tinggi antara pulsa referensi dan deretan sampelnya, sehingga dapat disimpulkan bahwa informasi pada pulsa terletak pada nilai 10 tersebut.

Pada radar, korelasi silang ini digunakan untuk mendeteksi jarak dari target. Sinyal yang diolah adalah sinyal yang diterima oleh penerima. Sinyal tersebut telah mengalami *delay* dan mengandung *noise* (*noise* AWGN). Korelasi silang akan mencari informasi *delay* diantara deretan sinyal yang mengandung *noise* AWGN. Informasi tersebut, yang disebut diatas sebagai *lag*, merepresentasikan posisi target yang dideteksi radar. *Delay* pada sinyal (t_d) yang merepresentasikan jarak tertentu (R) dirumuskan pada persamaan (2.18)

$$t_d = \frac{2R}{c} \quad (2.18)$$

dimana t_d dalam detik dan $c = 3 \times 10^8$ m/s.

Untuk mengetahui isi informasi jarak target, dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.1).

2.7 Resolusi Radar [10]

Resolusi radar adalah kemampuan radar untuk mendeteksi 2 target yang berbeda pada posisi yang saling berdekatan. Semakin kecil resolusi

radar, maka kemampuan radar akan semakin baik. Seperti dijelaskan pada sub bab 1.1, sistem radar MIMO-FMCW digunakan untuk mendeteksi jarak dan DoA target, maka akan dicari resolusi jarak dan resolusi sudut untuk mengetahui jarak atau sudut minimum dari target yang bisa dideteksi oleh radar. Resolusi jarak ditulis pada persamaan (2.19)

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2.19)$$

dimana B adalah *bandwidth*. Sedangkan resolusi sudut ditulis pada persamaan (2.20)

$$t_d = \frac{c/f}{2d((MtMr)-1)\cos(\theta)} \quad (2.20)$$

dimana d adalah spasi antar elemen *array antenna* penerima, yang ditentukan pada persamaan (2.21)

$$d = \frac{2\pi}{c/f} \quad (2.20)$$

Mt merupakan jumlah elemen pemancar, Mr merupakan jumlah elemen penerima, dan θ merupakan *beamwidth* dari *array antenna* penerima.

2.8 Akurasi Deteksi [11]

Akurasi deteksi radar didapatkan dari *Root Mean Square Error* (RMS E) yang bergantung pada nilai SNR sistem. *Root Mean Square Error* (RMS E) yang bergantung pada nilai SNR sistem dapat dihitung melalui persamaan (2.21)

$$\sigma_{RN} = \frac{RMS E}{\sqrt{2 SNR_L}} \quad (2.21)$$

RMS E sendiri dapat diperoleh menggunakan persamaan (2.22)

$$RMS E = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^k (m(t)-n(t))^2}{k}} \quad (2.22)$$

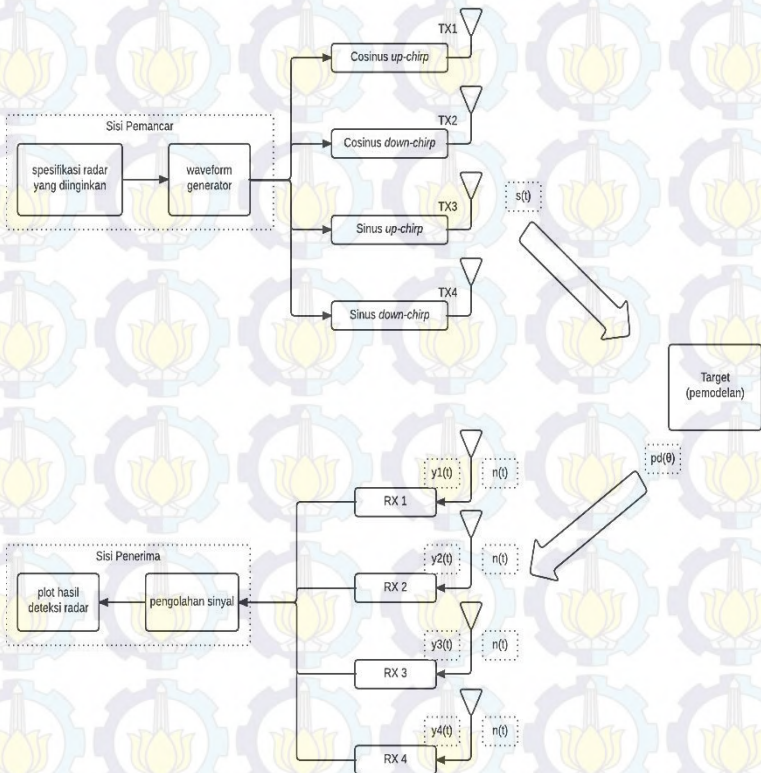
dimana k adalah banyaknya data, m adalah data hasil simulasi, dan n adalah data sebenarnya. Sehingga, akurasi deteksi radar dapat dihitung melalui persamaan (2.23)

$$\text{Akurasi Deteksi} = 1 - \sigma_{RN} \quad (2.23)$$



BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas metodologi dalam melakukan perancangan simulasi sistem radar MIMO-FMCW untuk deteksi target. Untuk melakukan simulasi sistem radar MIMO-FMCW, yang harus dilakukan adalah menentukan spesifikasi radar, pembangkitan sinyal, menentukan skenario pengukuran, pemodelan target, pengolahan sinyal hasil deteksi target, dan plot hasil simulasi. Diagram blok simulasi sistem radar MIMO-FMCW dapat dilihat pada **Gambar 3.1**



Gambar 3.1 Diagram Blok Simulasi Sistem Radar MIMO-FMCW

3.1 Spesifikasi Radar

Tugas akhir ini diharapkan mampu menjadi referensi dalam pengimplementasian radar MIMO-FMCW menggunakan perangkat keras, sehingga simulasi sistem dibuat sedekat mungkin dengan spesifikasi perangkat keras yang akan digunakan, yaitu modul *Universal Software Radio Peripheral* (USRP).

USRP N210/N2922 memiliki *IQ Sample Rate* 50 *Msample/second*, *IQ Sample Rate* adalah kemampuan perangkat dalam membaca data setiap detiknya. Sesuai dengan teorema Nyquist yaitu $f_s \geq 2f_m$, sehingga pada simulasi ini digunakan *bandwidth* 25 MHz untuk memaksimalkan kinerja USRP. Rentang frekuensi *chirp* yang dibangkitkan adalah 0-25 MHz.

Informasi yang ingin didapatkan dari sistem ini adalah informasi jarak dan DoA. Informasi jarak didapatkan dari pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang, sedangkan informasi DoA didapatkan dari pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC.

Kemampuan algoritma MUSIC memiliki keterbatasan yaitu hanya mampu mendeteksi target sebanyak M_r-1 (M_r adalah jumlah antenna array di sisi penerima) [9], maka sistem radar ini menggunakan sistem MIMO 4x4 agar dapat mendeteksi lebih dari 1 target. Dengan teori pada [9], maka jumlah maksimum target yang dapat dideteksi adalah sebanyak 3 target.

Berdasarkan uraian diatas, spesifikasi radar MIMO-FMCW yang diinginkan ditulis secara lengkap pada **Tabel 3.1**

Tabel 3.1 Spesifikasi Radar MIMO-FMCW yang Diinginkan

Spesifikasi	Nilai (satuan)
<i>Bandwidth</i>	25 (MHz)
Rentang Frekuensi <i>Chirp</i>	0-25 (MHz)
Informasi Deteksi Target	Jarak (meter) dan DoA (°)
Pengolahan Sinyal	Korelasi Silang (jarak) dan Algoritma MUSIC (DoA)
Konfigurasi MIMO	4 x 4

3.2 Pembangkitan Sinyal

Pada sub bab ini dilakukan pembangkitan gelombang LFM yang terdiri atas sinyal *up-chirp* dan *down-chirp*. Seperti yang telah dijelaskan

pada sub bab 3.1, rentang frekuensi *chirp* yang dibangkitkan adalah 0-25 MHz, dengan frekuensi tengah 12,5 MHz, dan ditentukan periode *chirp* atau lebar pulsa τ sebesar 6 μ s. Kemudian dimasukkan pada persamaan sinyal berdasarkan persamaan (2.6), (2.7), dan (2.8).

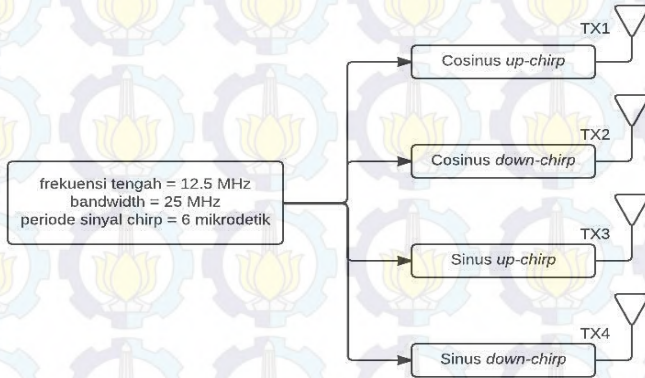
Karena sistem radar yang dibangun menggunakan konfigurasi MIMO, maka sinyal yang dipancarkan harus saling orthogonal agar tidak terjadi interferensi. Untuk menjaga orthogonalitas sinyal antar pemancar, maka ditambahkan beda fase 90° pada salah satu sinyal LFM. Persamaan (2.6), (2.7), dan (2.8) berubah menjadi persamaan (3.1), (3.2), (3.3), dan (3.4)

$$s_1(t) = A \cos(2\pi f t + (\mu/2\tau) ((t - \tau)^2)) \quad (3.1)$$

$$s_2(t) = A \cos(2\pi f t - (\mu/2\tau) ((t - \tau)^2)) \quad (3.2)$$

$$s_3(t) = A \cos\left(2\pi f t + (\mu/2\tau) ((t - \tau)^2)\right) + 90 \frac{\pi}{180} \quad (3.3)$$

$$s_4(t) = A \cos\left(2\pi f t - (\mu/2\tau) ((t - \tau)^2)\right) + 90 \frac{\pi}{180} \quad (3.4)$$



Gambar 3.2 Diagram Blok Pembangkitan Sinyal LFM

Maka sinyal yang dibangkitkan adalah *cosinus up-chirp* ($s_1(t)$), *cosinus down-chirp* ($s_2(t)$), *sinus up-chirp* ($s_3(t)$), dan *sinus down-chirp* ($s_4(t)$). Diagram blok pada tahap pembangkitan sinyal dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.

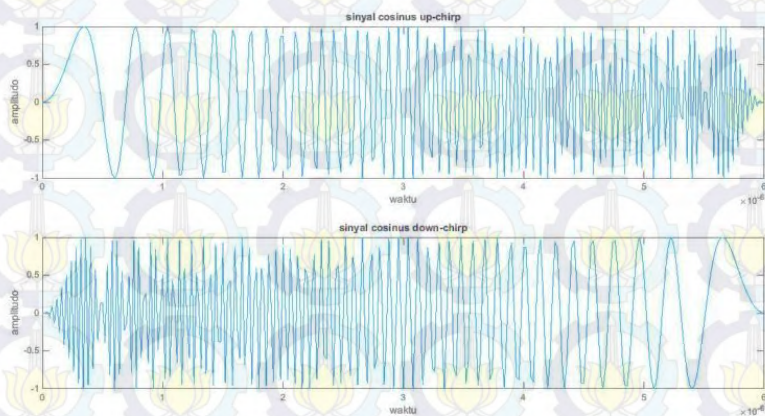
Setelah ditentukan periode *chirp* atau lebar pulsa τ sebesar 6 μ s, maka dapat dihitung *Maximum Unambiguous Range* menggunakan persamaan (2.2), sesuai pada persamaan (3.5)

$$R_{un} = \frac{(3 \times 10^8)(6 \times 10^{-6})}{2} \quad (3.5)$$

$$R_{un} = 900 \text{ m}$$

dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa *Maximum Unambiguous Range* sistem radar yang dibangun adalah sebesar 900 m, artinya jarak maksimum target yang dapat dideteksi radar adalah sejauh 900 m.

Sedangkan hasil pembangkitan sinyal menggunakan perangkat lunak MATLAB dapat dilihat pada **Gambar 3.3** dan **Gambar 3.4**

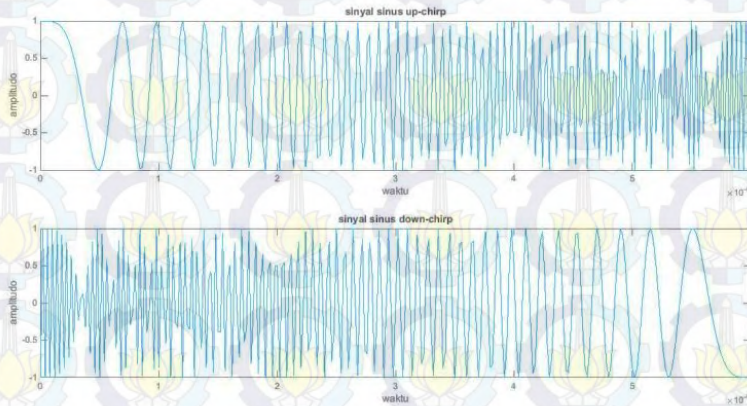


Gambar 3.3 Sinyal *Cosinus Up-Chirp* (atas) dan *Down-Chirp* (bawah)

Sinyal tersebut kemudian dilakukan proses *sampling* sesuai dengan perhitungan pada persamaan (3.6)

$$n_s = 2B\tau = 2(25 \times 10^6)(6 \times 10^{-6}) = 300 \text{ sampel} \quad (3.6)$$

dimana B adalah *bandwidth* dan τ adalah periode chirp. Karena sinyal mempunyai jumlah sampel (n_s) sebanyak 300, maka sinyal yang dibangkitkan merupakan sebuah matriks dengan ukuran $[1 \times 300]$.



Gambar 3.4 Sinyal *Sinus Up-Chirp* (atas) dan *Down-Chirp* (bawah)

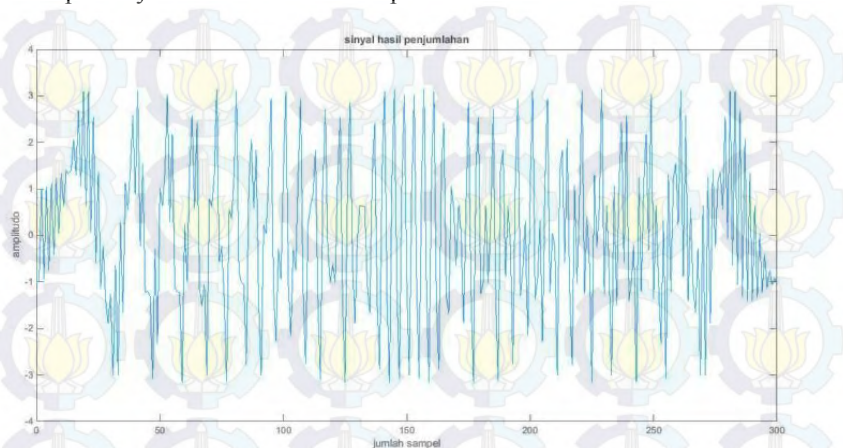
Setelah semua perhitungan tersebut selesai, maka sinyal siap dipancarkan. Keempat sinyal dipancarkan oleh 4 pemancar (TX) yang berbeda. Skenario yang dibuat adalah sinyal *cosinus up-chirp* dipancarkan oleh pemancar 1 (TX 1), sinyal *cosinus down-chirp* dipancarkan oleh pemancar 2 (TX 2), sinyal *sinus up-chirp* dipancarkan oleh pemancar 3 (TX 3), dan sinyal *sinus down-chirp* dipancarkan oleh pemancar 4 (TX 4). Skenario tersebut sesuai pada **Gambar 3.2**.

Pada implementasi sistem radar menggunakan perangkat keras, ketika ada lebih dari satu sinyal yang dipancarkan radar, maka seolah-olah hanya ada satu sinyal di kanal/udara. Dalam simulasi, ilustrasi tersebut direpresentasikan sebagai fungsi penjumlahan. Fungsi tersebut dapat dilihat pada persamaan (3.7)

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) + s_3(t) + s_4(t) \quad (3.7)$$

$s(t)$ merupakan matriks berukuran $[1 \times 300]$.

Hasil simulasi menggunakan MATLAB untuk penjumlahan keempat sinyal tersebut bisa dilihat pada **Gambar 3.5**



Gambar 3.5 Sinyal Hasil Penjumlahan 4 Pemancar

3.3 Pemodelan Target

Sebelum melakukan pemodelan target, harus ditentukan parameter target yang akan diidentifikasi oleh radar. Pada tugas akhir ini ditentukan 2 parameter target yang akan diidentifikasi oleh radar MIMO-FMCW, yaitu informasi jarak dan DoA.



Gambar 3.6 Ilustrasi Jarak yang Ditempuh oleh Sinyal yang Dipancarkan Radar hingga kembali diterima Radar

Jika melihat **Gambar 3.6**, radar memancarkan sinyal ke udara lalu mendeteksi sinyal *echo* yang diterima dari pantulan target. Waktu tempuh sinyal sejak dipancarkan hingga kembali ke radar dinotasikan sebagai *time delay* (t_d). *Time delay* (t_d) tersebut setara dengan 2 x jarak radar (R) ke target. Sehingga untuk mendapatkan informasi jarak target yang dideteksi, sesuai dengan persamaan (2.1), dapat dihitung menggunakan persamaan (3.8)

$$R = \frac{ct_d}{2} \quad (3.8)$$

Berdasarkan ilustrasi tersebut, maka pemodelan untuk menambahkan informasi jarak pada target adalah dengan menambahkan *delay* pada sinyal.

Pada simulasi, *delay* diperoleh dari hasil penambahan sejumlah deretan nilai 0 pada sinyal yang dipancarkan. *Delay* pada sinyal didapatkan menggunakan persamaan (2.18).

Sebelum *delay* tersebut ditambahkan pada sinyal, harus ditentukan jumlah sampel yang setara dengan nilai *delay* tersebut (n_d). Rumus yang digunakan sama seperti persamaan (3.6), namun variabel τ diganti dengan t_d . Sesuai persamaan (3.9)

$$n_d = 2Bt_d \quad (3.9)$$

dimana B adalah *bandwidth* dan t_d adalah *time delay* sesuai skenario jarak target yang ditentukan.

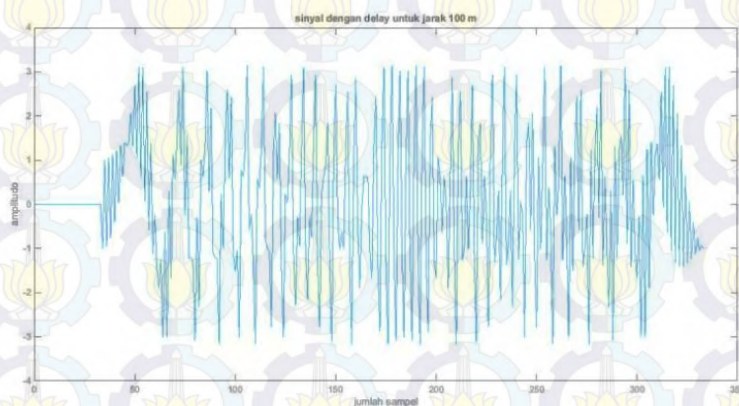
Setelah mengetahui jumlah sampel dari *delay*, kemudian membangkitkan nilai nol pada matriks ukuran [1 x (jumlah sampel setara *delay*)]. Lalu matriks tersebut disisipkan di deretan depan matriks sinyal yang dipancarkan. Proses tersebut akan menghasilkan matriks berukuran [1 x (300+jumlah sampel setara *delay*)].

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk sinyal dengan *delay* pada jarak 100 m dan 200 m dapat dilihat pada **Gambar 3.7** dan **Gambar 3.8**.

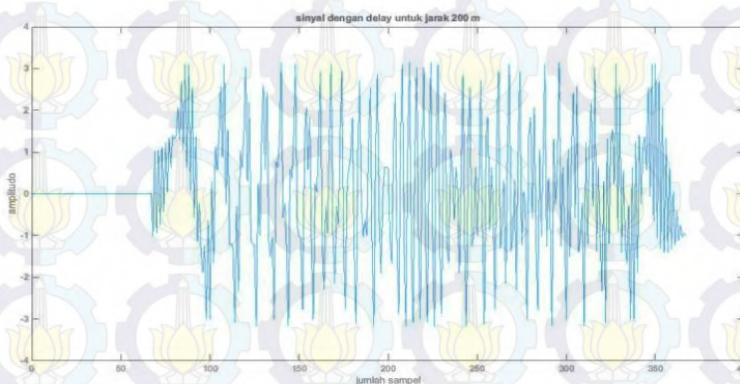
Untuk memberikan informasi DoA pada target, dilakukan proses *steering vector*. Proses *steering vector* ($A(\theta)$) dapat dilihat melalui diagram blok pada **Gambar 3.9**. Yang pertama dilakukan adalah menentukan skenario DoA yang diinginkan, sebagai contoh DoA pada

sudut 70° dan 110° , kemudian melakukan perhitungan *steering vector* menggunakan persamaan (2.14).

Hasil perhitungan *steering vector* akan menghasilkan matriks dengan ukuran [(jumlah elemen penerima) x (jumlah DoA target)]. Karena skenario DoA ditentukan pada sudut 70° dan 110° , sedangkan sistem radar MIMO-FMCW yang dibangun menggunakan sistem MIMO 4x4 (4 penerima), maka hasil perhitungan *steering vector* $A(\theta)$ akan menghasilkan matriks berukuran $[4 \times 2]$.

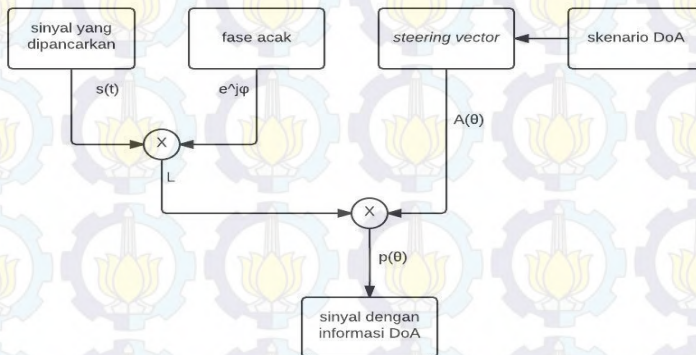


Gambar 3.7 Sinyal dengan *Delay* untuk Jarak 100 m



Gambar 3.8 Sinyal dengan *Delay* untuk Jarak 200 m

Tahap berikutnya adalah membangkitkan fase acak. Selain menyatakan hamburan target, fase acak juga menyatakan koefisien pantul yang merupakan bilangan kompleks. Proses pembangkitan fase acak dapat menggunakan persamaan (2.11), dengan asumsi amplitudo sama dengan 1. Fase acak $e^{j\varphi}$ yang dibangkitkan merupakan matriks dengan ukuran [(jumlah DoA target) x (jumlah sampel sinyal yang dipancarkan)].



Gambar 3.9 Diagram Blok Proses *Steering Vector*

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, terdapat 2 sudut DoA dan jumlah sampel sinyal yang dipancarkan sebanyak 300 sampel. Maka matriks hasil pembangkitan fase acak merupakan matriks berukuran [2 x 300].

Tahap ketiga adalah melakukan perkalian matriks antara fase acak dengan sinyal yang dipancarkan. Karena fase acak merupakan matriks berukuran [2 x 300], maka sinyal yang dipancarkan juga harus berukuran [2 x 300]. Sehingga sinyal yang dipancarkan diubah ukurannya menjadi [2 x 300], dimana baris pertama dan baris kedua merupakan sinyal dengan nilai yang sama. Hasil perkalian matriks tersebut (L) akan menghasilkan matriks berukuran [2 x 300].

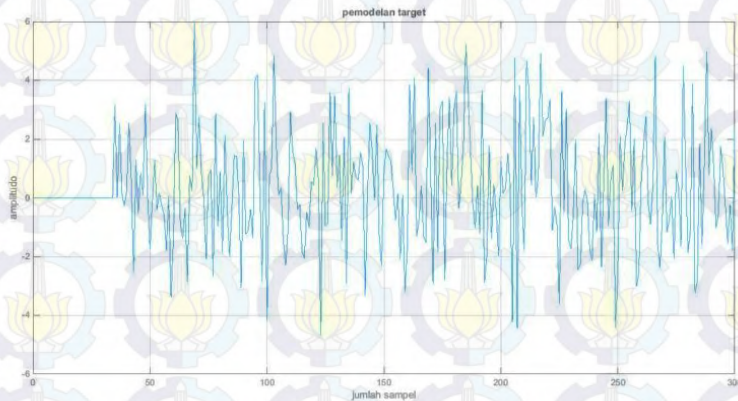
Hasil perkalian matriks tersebut kemudian dikalikan kembali dengan sinyal hasil *steering vector*. Perkalian ini akan menghasilkan matriks berukuran [4 x 300]. Perkalian tersebut dinotasikan dengan $p(\theta)$, dimana $p(\theta)$ sudah mengandung informasi DoA.

Agar dalam 1 pemodelan target sudah terkandung informasi jarak dan DoA ($pd(\theta)$), maka *delay* yang merepresentasikan jarak target disisipkan pada sisi depan matriks $p(\theta)$, sehingga $pd(\theta)$ menjadi matriks dengan ukuran $[4 \times (300 + \text{jumlah sampel setara delay})]$. $pd(\theta)$ dapat ditulis pada persamaan (3.10)

$$pd(\theta) = p(\theta) + t_d \quad (3.10)$$

dimana $p(\theta) = A(\theta) \cdot e^{j\varphi}$

Hasil pemodelan 2 target yang mengandung informasi jarak dan DoA ($pd(\theta)$) dapat dilihat pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 Sinyal yang mengandung *Steering Vector* dan *Delay*

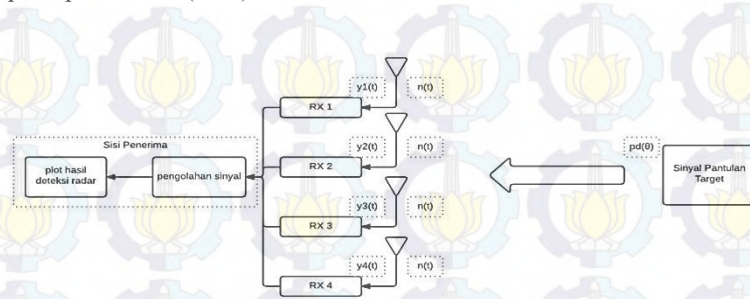
3.4 Sisi Radar Penerima (*Receiver*)

Ketika sinyal dipancarkan radar hingga sampai ke sisi penerima (RX), sinyal akan mengalami gangguan berupa *noise*. Pada simulasi ini diasumsikan sinyal terkena dampak *Additional White Gaussian Noise* (AWGN).

Diagram blok pada sisi penerima dapat dilihat pada **Gambar 3.11**.

Agar *noise* AWGN tidak terlalu mengganggu sinyal yang akan masuk ke penerima, maka SNR sistem ditentukan sebesar 20 dB. AWGN ($n(i)$) ini kemudian dijumlahkan dengan sinyal yang telah

mengandung informasi jarak dan DoA ($pd(\theta)$). Sehingga dapat ditulis pada persamaan (3.11)

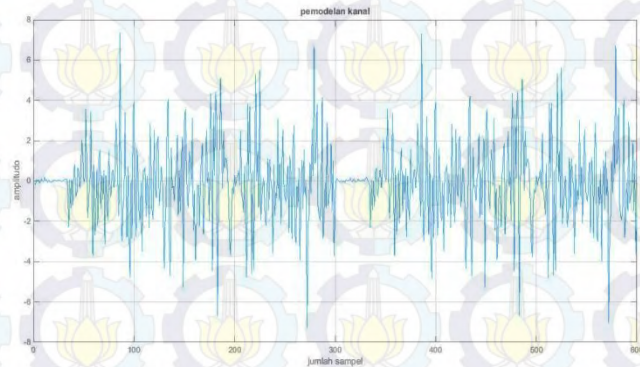


Gambar 3.11 Diagram Blok pada Sisi Radar Penerima

$$y(t) = pd(\theta) + n(t) \quad (3.11)$$

$y(t)$ adalah sinyal yang masuk ke penerima. Pada simulasi, diasumsikan sinyal $y_1(t)$ masuk ke antenna penerima 1 (RX 1), sinyal $y_2(t)$ masuk ke antenna penerima 2 (RX 2), sinyal $y_3(t)$ masuk ke antenna penerima 3 (RX 3), dan sinyal $y_4(t)$ masuk ke antenna penerima 1 (RX 4). Asumsi ini sesuai pada **Gambar 3.11**.

Hasil pemodelan kanal menggunakan perangkat lunak MATLAB dapat dilihat pada **Gambar 3.12**.



Gambar 3.12 Sinyal Hasil Pemodelan Kanal untuk SNR 20 dB

3.5 Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target

Informasi yang ingin didapatkan dalam proses ini adalah informasi jarak dan DoA. Seperti yang telah diatur pada sub bab 3.1, informasi jarak didapatkan dari proses pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang. Sedangkan informasi DoA didapatkan dari proses pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC.

3.5.1 Algoritma MUSIC

Algoritma MUSIC digunakan untuk mendapatkan informasi DoA dari target. Diagram blok proses pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC dapat dilihat pada **Gambar 3.13**.

Seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab 2.6, dalam algoritma MUSIC, langkah pertama adalah menentukan matriks kovarian dari sinyal yang diterima (\bar{R}_{xx}), yang didapatkan dengan melalui persamaan (2.10). Jika meneruskan perhitungan pada sub bab 3.4 dan 3.5, maka pada proses ini akan didapatkan matriks berukuran $[4 \times 4]$.



Gambar 3.13 Diagram Blok Pengolahan Sinyal Menggunakan Algoritma MUSIC

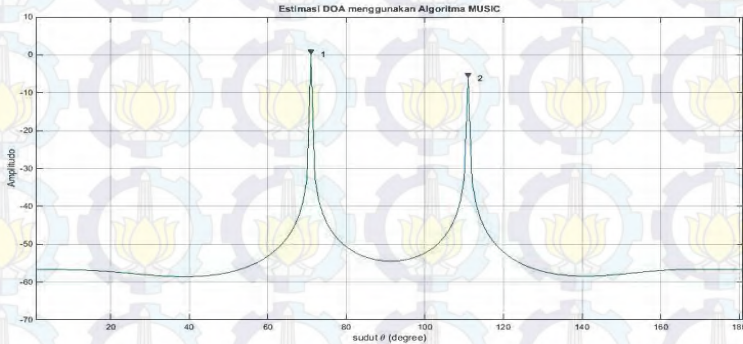
Kemudian menentukan *eigenvector noise subspace* (\bar{E}_N) yang memiliki ukuran $[4 \times 4]$ sesuai perhitungan menggunakan persamaan (2.12). Setelah itu dilakukan proses *steering vector* (untuk mendapatkan nilai θ menggunakan persamaan (2.14). Karena DoA sistem pada rentang 0° - 180° , proses ini akan menghasilkan matriks berukuran $[4 \times 181]$. Maka didapatkan estimasi DoA dengan algoritma MUSIC ($P_{MU}(\theta)$) menggunakan rumus (2.13).

Plot hasil pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC untuk deteksi 2 target dengan skenario DoA pada sudut 70° dan 110° dapat dilihat pada **Gambar 3.14**

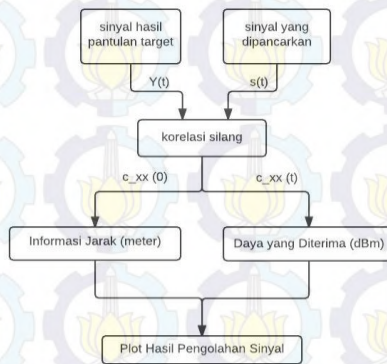
3.5.2 Korelasi Silang

Korelasi silang digunakan untuk mendapatkan informasi jarak dari target. Diagram blok proses pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang dapat dilihat pada **Gambar 3.15**.

Tahap pertama yang dilakukan adalah melakukan korelasi silang antara $s(t)$ dan $Y(t)$ menggunakan persamaan (2.16). Dengan $s(t)$ merupakan sinyal yang dipancarkan oleh radar, dan $Y(t)$ adalah sinyal yang diterima radar.



Gambar 3.14 Hasil Pengolahan Sinyal menggunakan Algoritma MUSIC



Gambar 3.15 Diagram Blok Pengolahan Sinyal menggunakan Korelasi Silang

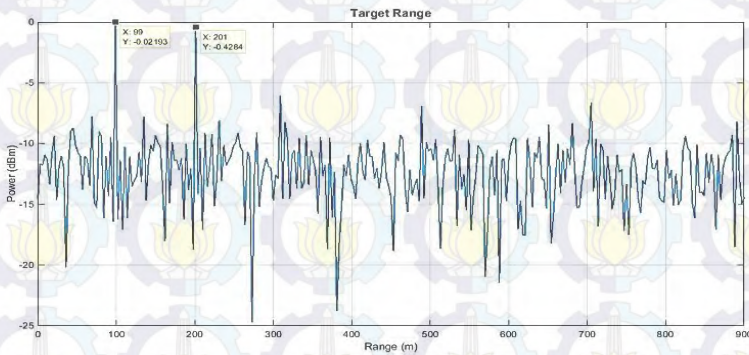
Sesuai teori pada sub bab 2.7, hasil perhitungan menggunakan persamaan (2.16) akan didapatkan autokorelasi $c_{xx}(t)$ dari sinyal. Autokorelasi tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan daya yang diterima radar. Daya yang diterima radar didapatkan menggunakan persamaan (3.12)

$$E_x = 10 * \log_{10}(c_{xx}(t)) \quad (3.12)$$

Sedangkan informasi posisi target didapatkan dengan persamaan (2.1). Nilai T_R diganti dengan nilai *lag* dari nilai autokorelasi maksimum yang telah didapatkan sebelumnya dan dikalikan waktu sampling t_s . Seperti dijelaskan pada sub bab 2.7, *lag* adalah titik puncak dari fungsi autokorelasi, yaitu ketika $t = 0$. Sesuai persamaan (3.8)

$$R = \frac{c \text{ lag } t_s}{2} \quad (3.8)$$

Hasil simulasi menggunakan perangkat MATLAB untuk target pada jarak 100 m dan 200 m dapat dilihat pada **Gambar 3.16**.

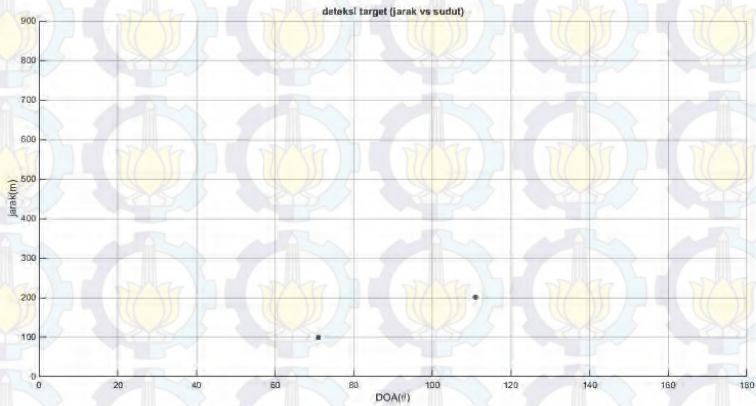


Gambar 3.16 Hasil Pengolahan Sinyal menggunakan Korelasi Silang

3.6 Plot Hasil Deteksi Radar

Setelah sinyal hasil pantulan target diolah dan didapatkan informasi jarak dan DoA target, kemudian dilakukan plot untuk memudahkan dalam pembacaan informasi. Ada 3 plot yang dibuat pada simulasi sistem radar MIMO-FMCW, yaitu plot hasil pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC sesuai **Gambar 3.14**, plot hasil pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang sesuai **Gambar 3.16**, dan yang terakhir informasi dari jarak dan DoA target diambil, kemudian dilakukan plot jarak vs sudut. Plot hasil pengolahan sinyal

untuk informasi jarak dan DoA dari 2 target pada posisi (100 m, 70°) dan (200 m, 110°) dapat dilihat pada **Gambar 3.17**.



Gambar 3.17 Plot Hasil Pengolahan Sinyal untuk Informasi Jarak dan DoA

Pada **Gambar 3.17**, sumbu x adalah informasi DoA target yang dideteksi radar, dan sumbu y adalah informasi jarak target yang dideteksi radar.

3.7 Simulasi Radar MIMO-FMCW menggunakan Perangkat Lunak MATLAB

Untuk menguji kinerja sistem radar MIMO-FMCW yang telah dibuat, maka dilakukan simulasi sistem. Pada tugas akhir ini dilakukan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak MATLAB R2014b. Sub bab ini membahas cara memodelkan sistem radar MIMO-FMCW pada perangkat lunak MATLAB.

3.7.1 Spesifikasi Radar

Sebagai masukan (*input*) sistem, maka langkah pertama yang dilakukan adalah memasukkan spesifikasi radar yang diinginkan pada *Editor* MATLAB. Spesifikasi yang dimasukkan yaitu panjang sinyal *chirp* yang dibangkitkan (t_{ho}), *bandwidth* sistem (B), frekuensi tengah sinyal *chirp* (f), *theta* untuk menjaga ortogonalitas antar sinyal yang dipancarkan (θ), jumlah sampel (ns), waktu *sampling* (ts), frekuensi

sampling (fs), jumlah antena pemancar (M_t) dan penerima (M_r), SNR sistem dalam dB (SNRdB), dan spasi antar elemen antena (d).

3.7.2 Pembangkitan Sinyal

Langkah kedua adalah proses pembangkitan sinyal. Persamaan sinyal LFM yang digunakan sesuai pada persamaan (3.1), (3.2), (3.3), (3.4). Variabel-variabel yang ada pada persamaan sinyal tersebut disesuaikan dengan variabel masukan spesifikasi radar yang sudah dijelaskan pada sub bab 3.6.1.

3.7.3 Pemodelan Target

Ada 2 parameter target yang akan diidentifikasi oleh radar MIMO-FMCW, yaitu informasi jarak dan DoA.

Seperti yang telah dijelaskan di sub bab 3.3, pemodelan untuk menambahkan informasi jarak pada target adalah dengan menambahkan *delay* pada sinyal. Pada simulasi, *delay* diperoleh dari hasil penambahan sejumlah deretan nilai 0 pada sinyal yang dipancarkan.

Nilai 0 dibangkitkan menggunakan fungsi *zeros* yang sudah tersedia di perangkat lunak MATLAB. Nilai 0 yang dibangkitkan sejumlah 1 baris dan kolom sejumlah jumlah sampel yang setara dengan *delay* yang diinginkan. Agar jumlah kolom merupakan bilangan bulat, maka digunakan fungsi *round*.

Sedangkan untuk memberikan informasi DoA pada target, dilakukan proses *steering vector*. Karena proses *steering vector* akan dihasilkan matriks berukuran [(jumlah elemen penerima) x (jumlah DoA target)], maka dilakukan *loop* sesuai banyaknya skenario DoA yang dibuat. Loop tersebut akan menghasilkan matriks berukuran [(jumlah DoA target) x (jumlah elemen penerima)]. Kemudian dilakukan *transpose* pada matriks tersebut dengan cara memberikan tanda petik satu ('), maka akan didapatkan matriks berukuran [(jumlah elemen penerima) x (jumlah DoA target)].

Kemudian dibangkitkan fase acak. Sesuai teori pada sub bab 2.6, dimana fase acak terdistribusi *random uniform*, maka proses pembangkitan pada perangkat lunak MATLAB menggunakan fungsi *rand*. Fungsi *rand* memberikan bilangan *pseudorandom* yang terdistribusi *uniform*. Tahap selanjutnya dilakukan operasi matematika sesuai pada perhitungan yang telah dijelaskan pada sub bab 3.3.

3.7.4 Sisi Radar Penerima (*Receiver*)

Setelah dilakukan pemodelan target, maka sinyal tersebut kemudian ditambahkan *noise* sebagai representasi telah sampai di antena penerima. Telah dijelaskan pada sub bab 3.4 bahwa *noise* yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak MATLAB adalah AWGN.

AWGN sudah tersedia sebagai fungsi MATLAB, sehingga cukup memasukkan fungsi *awgn* dan SNRdB sebagai parameter bagi MATLAB dalam membangkitkan *noise*. Semakin besar nilai SNRdB, maka efek AWGN terhadap sinyal akan semakin kecil.

3.7.5 Pengolahan Sinyal Hasil Deteksi Target

Seperti yang telah diatur pada sub bab 3.1, informasi jarak didapatkan dari proses pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang. Sedangkan informasi DoA didapatkan dari proses pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC.

Untuk pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC pada perangkat lunak MATLAB, matriks kovarian merupakan perkalian sinyal hasil deteksi target dikalikan dengan *transpose* sinyal tersebut. Kemudian untuk mencari *eigenvector noise subspace*, menggunakan DoA menghasilkan *eigenvector* dan *eigenvalue* dari matriks kovarian. Berdasarkan teori pada sub bab 2.6, untuk pengolahan sinyal ini cukup diambil *eigenvector* saja.

Kemudian melakukan *steering vector* untuk mencari DoA target. DoA dicari pada rentang 0° - 180° , sehingga *steering vector* dilakukan *loop* dari 0 hingga 180. Matriks hasil *steering vector* berukuran $[4 \times 181]$.

Maka dapat diketahui DoA target menggunakan persamaan (2.13).

Untuk pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang, menggunakan fungsi *xcorr* yang sudah tersedia pada perangkat lunak MATLAB. Fungsi *xcorr* ini akan menghasilkan keluaran *acorr* atau autokorelasi dan *lag* atau autokorelasi pada nilai maksimum ($t = 0$).

Sesuai teori pada sub bab 2.7, *acorr* dapat digunakan untuk mengetahui besarnya daya yang diterima. Sedangkan *lag* dapat digunakan untuk mengetahui posisi jarak target yang dideteksi radar.

3.7.6 Plot Hasil Deteksi Radar

Seperti telah dijelaskan pada sub bab 3.6, plot yang dihasilkan pada simulasi sistem radar MIMO-FMCW ada 3, yaitu plot hasil pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC, pengolahan sinyal

menggunakan korelasi silang, dan plot hasil pengolahan sinyal untuk informasi jarak dan DoA.

Plot hasil pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC didapatkan dari fungsi *plot* dimana sumbu x adalah informasi DoA hasil pengolahan sinyal menggunakan algoritma MUSIC, dan sumbu y adalah daya yang diterima antena.

Plot hasil pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang juga didapatkan dari fungsi *plot* dimana sumbu x adalah informasi jarak hasil perhitungan dari persamaan (2.8), dan sumbu y adalah daya yang diterima antena.

Untuk plot hasil pengolahan sinyal untuk informasi jarak dan DoA didapatkan dari fungsi *findpeaks* pada masing-masing pengolahan sinyal. Fungsi *findpeaks* akan mengambil nilai yang memiliki amplitudo puncak pada masing-masing pengolahan sinyal. Informasi jarak dan DoA hasil pengolahan sinyal merupakan *peak* dengan amplitudo tertinggi, sehingga setelah penggunaan fungsi *findpeaks* ini, kemudian menggunakan fungsi *sort ascending* untuk menemukan informasi jarak dan DoA target. Jumlah data yang diambil setelah fungsi *sort ascending* masih bergantung pada banyaknya skenario jarak dan DoA yang ditetapkan. Kekurangan lainnya adalah skenario posisi target 1 harus terletak pada jarak dan DoA yang lebih kecil dari skenario posisi target 2.

3.8 Skenario Simulasi Pengujian Kinerja Radar MIMO-FMCW

Untuk menguji kinerja sistem radar MIMO-FMCW yang telah dibuat, maka diperlukan beberapa skenario simulasi. Sesuai dengan permasalahan yang ingin diselesaikan pada Tugas Akhir ini, maka skenario yang dibuat berdasarkan kemampuan deteksi radar MIMO-FMCW dalam kaitannya dengan jumlah target maksimum yang bisa dideteksi radar. Telah dijelaskan pada sub bab 3.1, karena keterbatasan kemampuan algoritma MUSIC, untuk radar dengan konfigurasi MIMO 4x4 mampu mendeteksi target maksimum sebanyak 3 target.

Simulasi pengujian kinerja radar MIMO-FMCW yang dilakukan tidak mendeteksi kecepatan target.

Deteksi target oleh radar MIMO-FMCW untuk mengetahui informasi jarak dalam meter (m) dan DoA dalam derajat ($^{\circ}$), dengan jarak pada rentang 0 m-900 m dan DoA pada rentang 0° - 180° .

Diasumsikan 0° pada sisi kiri gambar dan 180° di sisi kanan gambar.

Masing-masing skenario dilakukan 10 kali iterasi atau *running*.

3.8.1 Deteksi 1 Target

Untuk deteksi 1 target, skenario yang dibuat adalah

- Target ada pada posisi jarak 100 m dan DoA dari 0° hingga 180° untuk DoA setiap 10° .
- Target pada posisi DoA 70° dan jarak 0 m-900 m untuk jarak setiap 50 m.
- Untuk mengetahui jarak terdekat yang bisa dideteksi radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 1 target pada DoA 70° dan jarak 1 m, kemudian terus bertambah tiap 1 m hingga radar mampu mendeteksi jarak dari target.
- Untuk mengetahui jarak terjauh yang bisa dideteksi radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 1 target pada DoA 70° dan jarak 900 m, kemudian terus berkurang tiap 1 m hingga radar mampu mendeteksi jarak dari target.
- Untuk mengetahui akurasi deteksi dari radar MIMO-FMCW, dilakukan perhitungan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMS E) dan SNR sistem sesuai persamaan (2.21), (2.22), dan (2.23).

3.8.2 Deteksi 2 Target

Untuk deteksi 2 target, skenario yang dibuat adalah

- Target 1 ada pada posisi (100 m, 70°) dan target 2 ada pada posisi (200 m, 110°).
- Untuk mengetahui resolusi jarak dari deteksi 2 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 2 target dengan target 1 pada posisi (100 m, 70°) dan target 2 pada posisi (101 m, 110°). Jarak dari target 2 terus bertambah tiap 1 m hingga radar mampu mendeteksi 2 target pada jarak yang berbeda.
- Untuk mengetahui resolusi sudut dari deteksi 2 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 2 target dengan target 1 pada posisi (100 m, 80°) dan target 2 pada posisi (200 m, 81°). DoA dari target 2 terus bertambah tiap 1° hingga radar mampu mendeteksi 2 target pada DoA yang berbeda.

Untuk mengetahui akurasi deteksi dari radar MIMO-FMCW, dilakukan perhitungan menggunakan *Root Mean Square Error*

(RMS E) dan SNR sistem sesuai persamaan (2.21), (2.22), dan (2.23).

3.8.3 Deteksi 3 Target

Untuk deteksi 3 target, skenario yang dibuat adalah

- Target 1 pada posisi (100 m, 30°), target 2 pada posisi (200 m, 70°), dan target 3 pada posisi (300 m, 110°).
- Untuk mengetahui resolusi jarak dari deteksi 3 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 3 target dengan jarak antar target menyesuaikan hasil resolusi jarak untuk deteksi 2 target. Bila tidak terdeteksi 3 target, jarak antar target terus bertambah hingga radar mampu mendeteksi 3 target pada jarak yang berbeda.
- Untuk mengetahui resolusi sudut dari deteksi 3 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 3 target dengan selisih DoA antar target menyesuaikan hasil resolusi sudut untuk deteksi 2 target. Bila tidak terdeteksi 3 target, jarak antar target terus bertambah hingga radar mampu mendeteksi 3 target pada DoA yang berbeda.

Untuk mengetahui akurasi deteksi dari radar MIMO-FMCW, dilakukan perhitungan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMS E) dan SNR sistem sesuai persamaan (2.21), (2.22), dan (2.23).

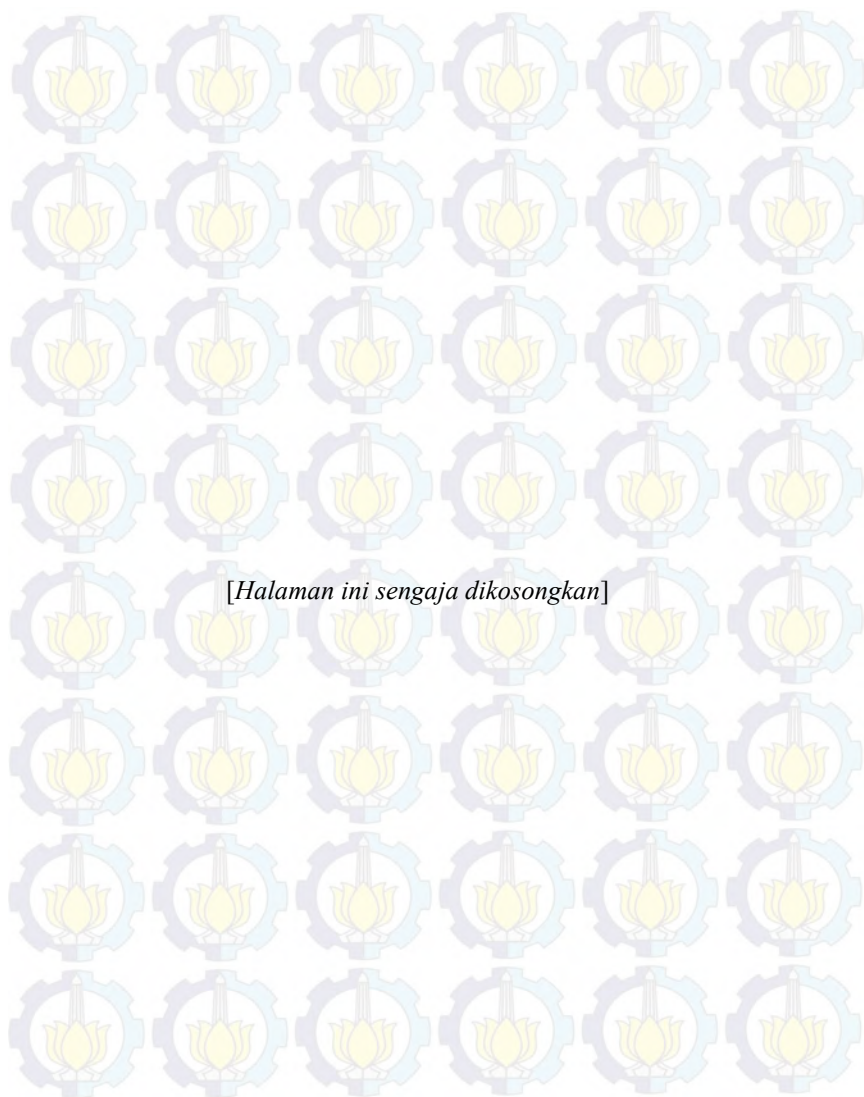
3.8.4 Deteksi 4 Target

Untuk deteksi 4 target, skenario yang dibuat adalah

- Target 1 pada posisi (100 m, 30°), target 2 pada posisi (200 m, 70°), target 3 pada posisi (300 m, 110°), target 4 pada posisi (400 m, 150°).
- Untuk mengetahui resolusi jarak dari deteksi 4 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 4 target dengan jarak antar target menyesuaikan hasil resolusi jarak untuk deteksi 2 target. Bila tidak terdeteksi 4 target, jarak antar target terus bertambah hingga radar mampu mendeteksi 4 target pada jarak yang berbeda.
- Untuk mengetahui resolusi sudut dari deteksi 4 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 4 target dengan selisih DoA antar target menyesuaikan hasil resolusi sudut untuk deteksi 2 target. Bila tidak terdeteksi 4 target, jarak antar target

terus bertambah hingga radar mampu mendeteksi 4 target pada DoA yang berbeda.

Untuk mengetahui akurasi deteksi dari radar MIMO-FMCW, dilakukan perhitungan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMS E) dan SNR sistem sesuai persamaan (2.21), (2.22), dan (2.23).



BAB 4

ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM RADAR MIMO-FMCW

Pada bab ini akan dilakukan pembahasan dan analisis data berdasarkan simulasi sistem radar MIMO-FMCW dengan berbagai skenario yang telah ditentukan pada sub bab 3.8.

4.1 Analisis Deteksi 1 Target

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk target pada posisi jarak 100 m dan DoA dari 0° hingga 180° untuk DoA setiap 10° dapat dilihat pada **Tabel 4.1**

Tabel 4.1 Hasil Simulasi Deteksi 1 Target pada Jarak 100 m dan DoA dari 0° hingga 180° untuk DoA setiap 10° (SNR = 20 dB)

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi	Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi (rata-rata)
100 m	99 m	0°	54.7°
100 m	99 m	10°	11°
100 m	99 m	20°	21°
100 m	99 m	30°	31°
100 m	99 m	40°	41°
100 m	99 m	50°	51°
100 m	99 m	60°	61°
100 m	99 m	70°	71°
100 m	99 m	80°	81°
100 m	100 m	90°	91°
100 m	99 m	100°	101°
100 m	99 m	110°	111°
100 m	99 m	120°	121°
100 m	99 m	130°	131°
100 m	99 m	140°	141°

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi	Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi (rata-rata)
100 m	99 m	150°	151°
100 m	99 m	160°	161°
100 m	99 m	170°	171°
100 m	99 m	180°	73.6°

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.1**, dapat ditarik kesimpulan bahwa radar MIMO-FMCW dapat mendeteksi DoA target dari 10°-170°.

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk target pada posisi DoA 70° dan jarak 0 m-900 m untuk jarak setiap 50 m dapat dilihat pada **Tabel 4.2**

Tabel 4.2 Hasil Simulasi Deteksi 1 Target pada DoA 70° dan jarak 0-900 m untuk jarak setiap 50 m (SNR 20 dB)

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi	Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)
70°	71°	50 m	51 m
70°	71°	100 m	99 m
70°	71°	150 m	150 m
70°	71°	200 m	201 m
70°	71°	250 m	249 m
70°	71°	300 m	300 m
70°	71°	350 m	351 m
70°	71°	400 m	399 m
70°	71°	450 m	450 m
70°	71°	500 m	501 m
70°	71°	550 m	549 m
70°	71°	600 m	600 m
70°	71°	650 m	651 m
70°	71°	700 m	699 m
70°	71°	750 m	750 m
70°	71°	800 m	801 m
70°	71°	850 m	849 m

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi	Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)
70°	71°	900 m	480 m

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.2**, dapat ditarik kesimpulan bahwa radar MIMO-FMCW dapat mendeteksi jarak target. Namun hasil tersebut tidak sesuai dengan perhitungan pada persamaan (3.1), yaitu radar mampu mendeteksi target hingga 900 m.

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk deteksi 1 target pada DoA 70° dan jarak 1 m, kemudian terus bertambah tiap 1 m hingga radar mampu mendeteksi jarak dari target dapat dilihat pada **Tabel 4.3**

Tabel 4.3 Hasil Simulasi Jarak Terdekat Target dari Radar (SNR = 20 dB)

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi	Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)
70°	71°	1 m	0 m dan 900 m
70°	71°	2 m	3 m

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.3**, dapat ditarik kesimpulan bahwa jarak terdekat target yang bisa dideteksi radar pada jarak 2 m.

Skenario berikutnya adalah deteksi 1 target pada DoA 70° dan jarak 900 m, kemudian terus berkurang tiap 1 m hingga radar mampu mendeteksi jarak dari target. Karena hasil simulasi pada **Tabel 4.2** menunjukkan bahwa jarak 900 m tidak bisa dideteksi oleh radar MIMO-FMCW, maka skenario diubah menjadi dari jarak 850 m, bertambah tiap 1 m hingga radar tidak mampu mendeteksi target. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk deteksi 1 target pada DoA 70° dan jarak 850 m, bertambah tiap 1 m hingga radar tidak mampu mendeteksi target dapat dilihat pada **Tabel 4.4**

Tabel 4.4 Hasil Simulasi Jarak Terjauh Target dari Radar (SNR = 20 dB)

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi	Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)
70°	71°	850 m	849 m

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi	Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi
70°	71°	851 m	850 m
70°	71°	852 m	853 m
70°	71°	853 m	853 m
70°	71°	854 m	854 m
70°	71°	855 m	854 m
70°	71°	856 m	855 m
70°	71°	857 m	857 m
70°	71°	858 m	859 m
70°	71°	859 m	870 m
70°	71°	860 m	859 m
70°	71°	861 m	860 m
70°	71°	862 m	861 m
70°	71°	863 m	862 m
70°	71°	864 m	863 m
70°	71°	865 m	866 m
70°	71°	866 m	866 m
70°	71°	867 m	868 m
70°	71°	868 m	867 m
70°	71°	869 m	868 m
70°	71°	870 m	870 m
70°	71°	871 m	871 m
70°	71°	872 m	873 m dan 441 m

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.4**, dapat ditarik kesimpulan bahwa jarak terjauh target yang bisa dideteksi radar pada jarak 871 m.

Untuk mengetahui akurasi deteksi 1 target dari radar MIMO-FMCW, dilakukan perhitungan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMS E) dan SNR sistem pada sub bab 2.8. Data yang digunakan adalah data pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2**. Akurasi deteksi radar didapatkan melalui persamaan (2.23). Hasil perhitungan akurasi deteksi radar dapat dilihat di **Tabel 4.5** dan **Tabel 4.6**

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 1 Target (DoA)

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
0°	54.7°	--
10°	11°	92.93 %
20°	21°	92.93 %
30°	31°	92.93 %
40°	41°	92.93 %
50°	51°	92.93 %
60°	61°	92.93 %
70°	71°	92.93 %
80°	81°	92.93 %
90°	91°	92.93 %
100°	101°	92.93 %
110°	111°	92.93 %
120°	121°	92.93 %
130°	131°	92.93 %
140°	141°	92.93 %
150°	151°	92.93 %
160°	161°	92.93 %
170°	171°	92.93 %
180°	73.6°	--

Dari hasil perhitungan pada **Tabel 4.5**, dapat ditarik kesimpulan bahwa rata-rata akurasi deteksi radar untuk deteksi DoA 10°-170° adalah sebesar 92.93 %. Untuk DoA 0° dan 180° tidak masuk perhitungan karena rata-rata *error* yang terlalu besar.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 1 Target (Jarak)

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
50 m	51 m	92.93 %
100 m	99 m	92.93 %
150 m	150 m	100 %
200 m	201 m	92.93 %
250 m	249 m	92.93 %
300 m	300 m	100 %

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
350 m	351 m	92.93 %
400 m	399 m	92.93 %
450 m	450 m	100 %
500 m	501 m	92.93 %
550 m	549 m	92.93 %
600 m	600 m	100 %
650 m	651 m	92.93 %
700 m	699 m	92.93 %
750 m	750 m	100 %
800 m	801 m	92.93 %
850 m	849 m	92.93 %
900 m	--	--

Dari hasil perhitungan pada **Tabel 4.6**, dapat ditarik kesimpulan bahwa rata-rata akurasi deteksi radar untuk deteksi jarak adalah sebesar 95.01 %, namun pada jarak 900 m tidak masuk perhitungan karena radar tidak mampu mendeteksi target pada posisi tersebut.

4.2 Analisis Deteksi 2 Target

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk target 1 pada posisi (100 m, 70°) dan target 2 pada posisi (200 m, 110°) dapat dilihat pada **Tabel 4.7**

Tabel 4.7 Hasil Simulasi Deteksi 2 Target (SNR = 20 dB)

Skenario Posisi Target	Posisi Target Hasil Simulasi (rata-rata)
(100 m, 70°)	(99 m, 71°)
(200 m, 110°)	(201 m, 111°)

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.7**, dapat ditarik kesimpulan bahwa radar MIMO-FMCW mampu mendeteksi 2 target.

Untuk mengetahui resolusi jarak dari deteksi 2 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan simulasi dengan target 1 pada posisi (100 m, 70°) dan target 2 pada posisi (101 m, 110°). Jarak dari target 2 terus bertambah tiap 1 m hingga radar mampu mendeteksi 2 target pada jarak

yang berbeda. Resolusi jarak radar dapat dihitung menggunakan persamaan (2.19)

$$\Delta R = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 25 \times 10^6} \quad (4.1)$$

$$\Delta R = 6 \text{ meter}$$

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk resolusi jarak radar MIMO FMCW dapat dilihat pada **Tabel 4.8**

Tabel 4.8 Hasil Simulasi Resolusi Jarak Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB)

Skenario Posisi Target	Posisi Target Hasil Simulasi (rata-rata)
(100 m, 70°)	(102 m, 71°)
(101 m, 110°)	(102 m, 111°)
(100 m, 70°)	(102 m, 71°)
(102 m, 110°)	(102 m, 111°)
(100 m, 70°)	(102 m, 71°)
(103 m, 110°)	(102 m, 111°)
(100 m, 70°)	(99 m, 71°)
(104 m, 110°)	(105 m, 111°)
(100 m, 70°)	(99 m, 71°)
(105 m, 110°)	(105 m, 111°)
(100 m, 70°)	(99 m, 71°)
(106 m, 110°)	(105 m, 111°)

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.8**, dapat ditarik kesimpulan bahwa resolusi jarak radar adalah sebesar 4 meter, lebih baik dibandingkan resolusi jarak menurut perhitungan pada persamaan (4.1) sebesar 6 meter.

Untuk mengetahui resolusi sudut dari radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 2 target dengan target 1 pada posisi (100 m, 80°) dan target 2 pada posisi (200 m, 81°). DoA dari target 2 terus bertambah tiap 1° hingga radar mampu mendeteksi 2 target pada DoA yang berbeda. Resolusi sudut dapat dihitung menggunakan persamaan (2.20).

$$t_d = 1^\circ \quad (4.2)$$

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB dapat dilihat pada **Tabel 4.9**

Tabel 4.9 Hasil Simulasi Resolusi Sudut Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB)

Skenario Posisi Target	Posisi Target Hasil Simulasi (rata-rata)
(100 m, 80°)	(99 m, 81°)
(200 m, 81°)	(201 m, 81°)
(100 m, 80°)	(99 m, 81°)
(200 m, 82°)	(201 m, 83°)

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.9**, dapat ditarik kesimpulan bahwa resolusi sudut adalah sebesar 2°, sedikit berbeda dibandingkan resolusi sudut menurut perhitungan pada persamaan (4.2) sebesar 1°.

Untuk mengetahui akurasi deteksi 2 target dari radar MIMO-FMCW, dilakukan perhitungan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMS E) dan SNR sistem pada sub bab 2.8. Data yang digunakan adalah data pada **Tabel 4.8** dan **Tabel 4.9**. Akurasi deteksi radar didapatkan melalui persamaan (2.23). Hasil perhitungan akurasi deteksi radar dapat dilihat di **Tabel 4.10** dan **Tabel 4.11**

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 2 Target (DoA)

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
70°	71°	92.93 %
80°	81°	92.93 %
82°	84°	71.72 %
110°	111°	92.93 %

Dari hasil perhitungan pada **Tabel 4.10**, dapat ditarik kesimpulan bahwa rata-rata akurasi deteksi radar untuk deteksi 2 target sebesar 87.63 %.

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 2 Target (jarak)

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
100 m	99 m	92.93 %
101 m	99 m	92.93 %

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
102 m	103 m	92.93 %
103 m	102 m	92.93 %
104 m	105 m	92.93 %
105 m	106 m	92.93 %
106 m	105 m	92.93 %

Dari hasil perhitungan pada **Tabel 4.11**, dapat ditarik kesimpulan bahwa rata-rata akurasi deteksi radar untuk deteksi 2 target sebesar 92.93 %.

4.3 Analisis Deteksi 3 Target

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk target 1 pada posisi (100 m, 30°), target 2 pada posisi (200 m, 70°), dan target 3 pada posisi (300 m, 110°) dapat dilihat pada **Tabel 4.12**

Tabel 4.12 Hasil Simulasi Deteksi 3 Target

Skenario Posisi Target	Posisi Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Error Deteksi
(100 m, 30°)	(99 m, 39°)	(1 m, 9°)
(200 m, 70°)	(201 m, 63°)	(1 m, 7°)
(300 m, 110°)	(300 m, 116°)	(0 m, 6°)

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.12**, dapat ditarik kesimpulan bahwa radar MIMO-FMCW mampu mendeteksi 3 target, namun error deteksi semakin besar bila dibandingkan hasil deteksi 1 dan 2 target.

Untuk mengetahui resolusi jarak dari deteksi 3 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 3 target dengan jarak antar target menyesuaikan hasil resolusi jarak untuk deteksi 2 target. Bila tidak terdeteksi 3 target, jarak antar target terus bertambah tiap 1 m hingga radar mampu mendeteksi 3 target pada jarak yang berbeda. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk resolusi jarak radar MIMO FMCW dapat dilihat pada **Tabel 4.13**

Untuk mengetahui resolusi sudut dari deteksi 3 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 3 target dengan selisih DoA antar target menyesuaikan hasil resolusi sudut untuk deteksi 2 target. Bila tidak terdeteksi 2 target, jarak antar target terus bertambah hingga radar

mampu mendeteksi 3 target pada DoA yang berbeda. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk resolusi sudut radar MIMO FMCW dapat dilihat pada **Tabel 4.14**

Tabel 4.13 Hasil Simulasi Resolusi Jarak Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB)

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)
100 m	99 m
104 m	-
108 m	108 m
100 m	99 m
105 m	105 m
110 m	111 m

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.13**, dapat ditarik kesimpulan bahwa resolusi jarak radar adalah sebesar 5 meter, lebih buruk 1 m dibandingkan resolusi jarak untuk deteksi 2 target, namun masih lebih baik dibandingkan resolusi jarak menurut perhitungan pada persamaan (4.1) sebesar 6 meter.

Tabel 4.14 Hasil Simulasi Resolusi Sudut Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB)

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi (rata-rata)
80°	81°
82°	85°
84°	-
30°	39°
70°	63°
110°	116°

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.14**, dapat ditarik kesimpulan bahwa resolusi sudut radar adalah sebesar 40°, lebih buruk dibandingkan resolusi sudut untuk deteksi 2 target dan resolusi sudut hasil perhitungan pada persamaan (4.2).

Untuk mengetahui akurasi deteksi 2 target dari radar MIMO-FMCW, dilakukan perhitungan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMS E) dan SNR sistem pada sub bab 2.8. Data yang digunakan adalah data pada **Tabel 4.12**, **Tabel 4.13**, dan **Tabel 4.14**. Akurasi deteksi radar

didapatkan melalui persamaan (2.23). Hasil perhitungan akurasi deteksi radar dapat dilihat di **Tabel 4.15** dan **Tabel 4.16**

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 3 Target (DoA)

Skenario DoA Target	DoA Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
30°	39°	--
70°	63°	36.36 %
110°	116°	--

Dari hasil perhitungan pada **Tabel 4.15**, dapat ditarik kesimpulan bahwa akurasi deteksi radar untuk deteksi 3 target lebih buruk dibandingkan akurasi deteksi radar untuk 2 target.

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 3 Target (jarak)

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
100 m	99 m	92.93 %
105 m	105 m	100 %
110 m	111 m	92.93 %

Dari hasil perhitungan pada **Tabel 4.16**, dapat ditarik kesimpulan bahwa rata-rata akurasi deteksi radar untuk deteksi 3 target tidak berbeda dengan deteksi 1 dan 2 target.

4.5 Analisis Deteksi 4 Target

Untuk deteksi 4 target, skenario yang dibuat adalah deteksi target dimana target 1 pada posisi (100 m, 30°), target 2 pada posisi (200 m, 70°), target 3 pada posisi (300 m, 110°), target 4 pada posisi (400 m, 150°).

Tabel 4.17 Hasil Simulasi Deteksi 4 Target

Skenario Posisi Target	Posisi Target Hasil Simulasi	Error Deteksi
(100 m, 30°)	(99 m, 17°)	(1 m, 13°)
(200 m, 70°)	(201 m, 68°)	(1 m, 2°)

(300 m, 110°) (400 m, 150°)	(300 m, 111°) (399 m, ---)	(0 m, 1°) (1 m, ---)
--------------------------------	-------------------------------	-------------------------

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.17**, dapat ditarik kesimpulan bahwa radar MIMO-FMCW hanya bisa mendeteksi 3 DoA, atau sesuai dengan teori yang telah dijelaskan pada sub bab 3.1.

Untuk mengetahui resolusi jarak dari deteksi 4 target pada radar MIMO-FMCW, dilakukan deteksi 4 target dengan jarak antar target menyesuaikan hasil resolusi jarak untuk deteksi 3 target. Bila tidak terdeteksi 4 target, jarak antar target terus bertambah tiap 1 m hingga radar mampu mendeteksi 4 target pada jarak yang berbeda. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk resolusi jarak radar MIMO FMCW dapat dilihat pada **Tabel 4.18**.

Sedangkan resolusi sudut dari deteksi 4 target pada radar MIMO-FMCW tidak dilakukan karena radar MIMO-FMCW hanya bisa mendeteksi 3 DoA.

Tabel 4.18 Hasil Simulasi Resolusi Jarak Radar MIMO-FMCW (SNR = 20 dB)

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)
100 m	99 m
105 m	105 m
110 m	111 m
115 m	--
100 m	99 m
106 m	105 m
112 m	111 m
118 m	117 m

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.18**, dapat ditarik kesimpulan bahwa resolusi jarak radar MIMO-FMCW untuk deteksi 4 target adalah sebesar 6 meter.

Dari hasil simulasi pada **Tabel 4.14**, dapat ditarik kesimpulan bahwa resolusi sudut radar adalah sebesar 40°, lebih buruk dibandingkan resolusi sudut untuk deteksi 2 target dan resolusi sudut hasil perhitungan pada persamaan (4.2).

Untuk mengetahui akurasi deteksi 4 target dari radar MIMO-FMCW, dilakukan perhitungan menggunakan *Root Mean Square Error*

(RMS E) dan SNR sistem pada sub bab 2.8. Data yang digunakan adalah data pada **Tabel 4.18**. Akurasi deteksi radar didapatkan melalui persamaan (2.23). Hasil perhitungan akurasi deteksi radar dapat dilihat di **Tabel 4.19**.

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan Akurasi Deteksi 4 Target (jarak)

Skenario Jarak Target	Jarak Target Hasil Simulasi (rata-rata)	Akurasi Deteksi Radar
100 m	99 m	92.93 %
105 m	105 m	100 %
106 m	105 m	92.93 %
110 m	111 m	92.93 %
112 m	111 m	92.93 %
118 m	117 m	92.93 %

Dari hasil perhitungan pada **Tabel 4.16**, dapat ditarik kesimpulan bahwa rata-rata akurasi deteksi radar untuk deteksi 4 target tidak berbeda dengan deteksi 1, 2, dan 3 target.

4.6 Sintesis

Sistem radar yang dibangun merupakan radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 4x4, menggunakan gelombang LFM, dan pemrosesan sinyal menggunakan korelasi silang untuk mendapatkan informasi jarak, serta algoritma MUSIC untuk mendapatkan informasi arah kedatangan (DoA).

Desain pembangkitan sinyal untuk sistem radar MIMO-FMCW harus memperhatikan ortogonalitas antar pemancar, agar tidak terjadi interferensi antar sinyal. Untuk itu sinyal yang dibangkitkan adalah *cosinus up-chirp*, *cosinus down-chirp*, *sinus up-chirp*, dan *sinus down-chirp*.

Sistem radar MIMO-FMCW yang dibangun tidak digunakan untuk mendeteksi kecepatan target.

Informasi yang ingin didapatkan dari deteksi target menggunakan radar MIMO-FMCW yaitu informasi jarak dan DoA. Desain pengolahan sinyal yang dibuat adalah pengolahan sinyal menggunakan korelasi silang untuk mendapatkan informasi jarak. Proses korelasi silang akan didapatkan nilai autokorelasi, dimana ketika nilai autokorelasi maksimum mengindikasikan bahwa informasi jarak target berada pada nilai tersebut. Desain pengolahan sinyal yang dibuat untuk mendapatkan

informasi DoA yaitu menggunakan algoritma MUSIC. Namun terdapat beberapa kelemahan dalam algoritma MUSIC, yaitu *error* dan akurasi deteksi akan semakin buruk ketika semakin banyak target yang dideteksi, serta kemampuan algoritma MUSIC yang hanya bisa mendeteksi target kurang dari jumlah antena penerima. Maka dari itu disarankan untuk menggunakan pengolahan sinyal lain yang mampu mendeteksi sebanyak mungkin target tanpa bergantung pada jumlah antena penerima yang digunakan, dan juga memiliki *error* dan akurasi deteksi yang lebih baik.

Sesuai penjelasan diatas, maka agar sistem radar MIMO-FMCW yang dibangun mampu mendeteksi lebih dari satu target, digunakan konfigurasi MIMO 4x4.

Berdasarkan analisis hasil simulasi sistem radar MIMO-FMCW, diketahui bahwa radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 4x4 menggunakan algoritma MUSIC mampu mendeteksi 1, 2, dan 3 target.

Jarak terdekat target yang bisa dideteksi radar adalah sejauh 2 m, dan jarak terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar adalah sejauh 871 m.

Rata-rata akurasi deteksi radar untuk deteksi 1 DoA 10° - 170° adalah sebesar 92.93 %. Untuk DoA 0° dan 180° tidak masuk perhitungan karena rata-rata *error* yang terlalu besar, deteksi 2 target sebesar 87.63 %, dan deteksi 3 target sebesar 36.36 %.

Rata-rata akurasi deteksi radar untuk deteksi jarak 1 target adalah sebesar 95.01 %, namun pada jarak 900 m tidak masuk perhitungan karena radar tidak mampu mendeteksi target pada posisi tersebut, deteksi 2 target sebesar 92.93 %, deteksi 3 target sebesar 92.93 %, dan deteksi 4 target sebesar 92.93 %..

Resolusi jarak radar MIMO-FMCW untuk deteksi 2 target sebesar 4 m, deteksi 3 target sebesar 5 m, dan deteksi 4 target sebesar 6 m.

Resolusi sudut radar MIMO-FMCW untuk deteksi 2 target sebesar 2° , sedangkan deteksi 3 target sebesar 40° .

Dengan optimasi proses pengolahan sinyal, radar MIMO-FMCW mampu untuk diterapkan sebagai salah satu teknologi pada *Automotive Vehicle*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir yang dilakukan oleh penulis, kesimpulan yang diperoleh adalah

- Sistem radar yang dibangun merupakan radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 4x4, menggunakan gelombang LFM, dan pemrosesan sinyal menggunakan korelasi silang untuk mendapatkan informasi jarak, serta algoritma MUSIC untuk mendapatkan informasi arah kedatangan (DoA).
- Radar MIMO-FMCW dengan konfigurasi MIMO 4x4 menggunakan algoritma MUSIC mampu mendeteksi 1,2, dan 3 target.
- Jarak terdekat target yang bisa dideteksi radar adalah sejauh 2 m, dan jarak terjauh target yang bisa dideteksi oleh radar adalah sejauh 871 m.
- Semakin banyak target yang dideteksi, akurasi deteksi DoA akan semakin turun.
- Banyaknya target yang dideteksi tidak mempengaruhi akurasi deteksi jarak.
- Resolusi jarak radar MIMO-FMCW untuk deteksi 2 target sebesar 4 m, deteksi 3 target sebesar 5 m, dan deteksi 4 target sebesar 6 m.
- Resolusi sudut radar MIMO-FMCW untuk deteksi 2 target sebesar 2° , sedangkan deteksi 3 target sebesar 40° .

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir yang dilakukan oleh penulis, saran yang diberikan adalah

- Karena keterbatasan kemampuan algoritma MUSIC, maka disarankan untuk menggunakan pengolahan sinyal lain yang mampu mendeteksi sebanyak mungkin target tanpa bergantung pada jumlah antenna penerima yang digunakan, dan juga memiliki *error* dan akurasi deteksi yang lebih baik.
- Mengembangkan sistem radar MIMO-FMCW untuk deteksi kecepatan target



LAMPIRAN A

PENGESAHAN PROPOSAL TUGAS AKHIR

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri – ITS

TE141599 TUGAS AKHIR – 4 SKS

Nama Mahasiswa : Ruhardika Nur Permana
Nomor Pokok : 2211 100 159
Bidang Studi : Telekomunikasi Multimedia
Tugas Diberikan : Semester Ganjil Th. 2015/2016
Dosen Pembimbing : I. Prof. Ir. Gamantyo Hendrantonoro, M.Eng, Ph.D.

17 SEP 2015


Judul Tugas Akhir : Radar MIMO-FMCW untuk Deteksi Target Bergerak
Menggunakan Algoritma MUSIC
(MIMO-FMCW Radar for Moving Target Detection With MUSIC Algorithm)

Uraian Tugas Akhir :

Sistem radar menggunakan lebih dari satu antena pada sisi penerima secara umum mampu meningkatkan performa radar, gagasan tersebut lebih dikenal dengan istilah array. Namun gagasan untuk menggunakan lebih dari satu antena pada sisi pemancar untuk mengirimkan sejumlah data masih sangat baru. Seperti pada teknologi Multiple Input, Multiple Output (MIMO) yang menggunakan lebih dari satu antena baik pada sisi pemancar maupun penerima. Teknologi MIMO telah sukses diaplikasikan untuk meningkatkan performa pada komunikasi *wireless*, dan kini akan dicoba untuk diaplikasikan pada radar.


Radar FMCW tidak memerlukan daya pancar yang besar untuk mendapatkan nilai SNR yang cukup untuk proses deteksi target, dari sisi hardware radar FMCW dapat dibangkitkan menggunakan *solid state amplifier* yang berukuran lebih kecil dan jauh lebih murah, dan radar FMCW sudah berhasil diterapkan untuk mengukur jarak dan kecepatan target bergerak. Pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan sistem radar MIMO-FMCW lalu mensimulasikannya menggunakan software LabVIEW. Pada tugas akhir ini hal yang menjadi fokus penelitian adalah menganalisis kemampuan radar MIMO-FMCW untuk mendapatkan nilai jarak, akurasi deteksi, jarak maksimum, dan arah kedatangan dari sebuah target bergerak.

Dosen Pembimbing,


Prof. Ir. Gamantyo Hendrantonoro, M.Eng, Ph.D.
Nip : 197011111993031002


Mengetahui,
Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS
Dip. Ir. Arief Sardjono, ST, MT
Nip : 197002121995121001

Menyetujui,
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia
Koordinator,


Dr. Ir. Endroyono DEA
Nip : 196504041991021001



LAMPIRAN B

SCRIPT SIMULASI PADA PERANGKAT LUNAK

MATLAB

```
clear all; close all, clc;

%% spesifikasi radar
tho = 6e-6; %periode chirp
B = 25000000; %bandwidth usrp (IQ rate)
f = 12500000; %frekuensi tengah
theta = [0 90]*pi/180; %untuk chirp sin dan cos
ns = 2*B*tho; %jumlah sampel (Nyquist)
tover = 2*tho; %over sweep oscillator (us)
ts = tho/ns; %sampling interval (s)
fs = 1.0/ts; %sampling rate (sample/s)
t = 0:ts:(tho-ts); %time data for time domain
plot

Mt = 4; %jumlah transmitter
Mr = 4; %jumlah receiver
R = 1; %system impedance (ohm)
SNRdB = 20;
SNR = 10.^(SNRdB/10);
dmax = 3*1.0e-6; dmax = 3.0e8*dmax/2;% target
max. dist. (m) to determine LPF bandwidth
lambda = 3e8/f;
d = lambda/2;

%% resolusi
delay_res = 1/(2*B); %resolusi delay
range_res = 3.0e8*delay_res; %resolusi jarak
max_range = (3e8*tho)/2; %jarak maksimum
target

angle_res = lambda/(2*((Mt*Mr)-1)*d*cos(180*pi/180)); %resolusi sudut
% disp(['Resolusi delay = ' num2str(delay_res)
' s'])
```



```

% disp(['Resolusi jarak = ' num2str(range_res)
' m'])
% disp(['Resolusi sudut = ' num2str(angle_res)
' degree'])

%% pembangkitan sinyal di transmitter (sinyal
LFM, chirp)
tetachirp1 = (2*pi*f.*t)+pi*(B/tho)*((t-
(tho/2)).^2)+0*pi/180;
TXIF1 = cos(tetachirp1); %up-chirp
tetachirp2 = (2*pi*f.*t)-pi*(B/tho)*((t-
(tho/2)).^2)+0*pi/180;
TXIF2 = cos(tetachirp2); %down-chirp
tetachirp3 = (2*pi*f.*t)+pi*(B/tho)*((t-
(tho/2)).^2)+90*pi/180;
TXIF3 = cos(tetachirp3); %up-chirp
tetachirp4 = (2*pi*f.*t)-pi*(B/tho)*((t-
(tho/2)).^2)+90*pi/180;
TXIF4 = cos(tetachirp4); %down-chirp

%% sinyal dalam bentuk kompleks
tx1 = ((exp(j*tetachirp1)))+(exp(-
j*tetachirp1))/2; %euler's formula
tx2 = ((exp(j*tetachirp2)))+(exp(-
j*tetachirp2))/2;
tx3 = ((exp(j*tetachirp3)))+(exp(-
j*tetachirp3))/2;
tx4 = ((exp(j*tetachirp4)))+(exp(-
j*tetachirp4))/2;

tx = tx1+tx2+tx3+tx4;

%% skenario target
sim_teta = [70 110];
deretteta = sim_teta/180*pi; %skenario sudut
kedatangan (DoA)

range = [200 300]; %skenario jarak target

```

```

s = length(deretteta);
r = length(range);

%% penambahan delay pada sinyal (informasi jarak)
td1 = 2*(range(1)/3e8); %sekon %time delay target
target1 = 2*B*td1; %jumlah sampel target
target1 = round(target1);
Y1 = zeros(1,target1); %membangkitkan nilai 0
rxs1 = [Y1;Y1;Y1;Y1];

td2 = 2*(range(2)/3e8); %sekon %time delay target
target2 = 2*B*td2; %jumlah sampel target
target2 = round(target2);
Y2 = zeros(1,target2); %membangkitkan nilai 0
rxs2 = [Y2;Y2;Y2;Y2];

%% steering vector
for m=1:s
    Ax(m,:) = exp(-
j*pi*cos(deretteta(m))*([0:Mr-1]));
end

%% sinyal masuk kanal, memantulkan target, masuk penerima
A = Ax';
fase = exp(j*rand(s,300)*2*pi); %fase acak
txx = [tx;tx]; %sinyal asli
lay = txx.*fase;
rxs = A*lay; %sinyal dengan informasi sudut

rxsd1 = [rxs1 rxs]; %sinyal dengan informasi sudut dan jarak
rxsd2 = [rxs2 rxs]; %sinyal dengan informasi sudut dan jarak

```

```

rxsd = rxsd1(:,1:300)+rxsd2(:,1:300); %sinyal
dengan informasi sudut dan jarak

rxsdal = awgn(rxsd, SNRdB); %awgn sebagai
representasi masuk kanal
rxsda2 = awgn(rxsd, SNRdB);

rxsda = [rxsdal rxsda2]; %sinyal di penerima
sebanyak dua periode

% pada sisi penerima, mencari elemen cos dan
sin
ns = 2*B*tover;% Nyquist theorem, USRP max. IQ
rate 50 MS/s
ts = tover/ns;% sampling time (s)
t = 0:ts:(tover-ts);% time data for time
domain plot

% algoritma music (pengolahan sinyal di
penerima) (informasi DoA) (elemen cos)
R=(rxsda*rxsda')/600; %matriks kovarian
[V,N]=eig(R); %eigenvector(V) dan
eigenvalue(N)
N = diag(N);
NN=V(:,1:2); %noise subspace
theta = 0:1:180;
SS = zeros(1,length(Mr));
    for ii=1:length(theta)
        for jj=1:Mr
            SS(jj,ii)=exp(-
j*j*jj*pi*cos(theta(ii)*pi/180)); %steering
vector
        end
    end
    for kk = 1:length(theta)
        PP(kk)=SS(:,kk) .* NN*NN.' * SS(:,kk);

```



```

end

Pmusic=abs(1./PP); %algoritma music
s = zeros(1,1018);
Pmusic = [Pmusic s];
Pmusic = 10*log10(Pmusic/max(Pmusic));
%Spatial spectrum function

figure
[mmax,lmax] =
findpeaks(Pmusic,'MinPeakHeight',-
20,'SortStr','descend');
findpeaks(Pmusic,'MinPeakHeight',-20)
text(lmax+2.5, mmax,
num2str((1:numel(mmax))))
grid on
xlabel('sudut \theta (degree)')
ylabel('Amplitudo')
title('Estimasi DOA menggunakan Algoritma
MUSIC')

%% detector
if length(lmax)<2
    lmax = [lmax(1) lmax(1)];
else
    lmax = lmax;
end

if lmax(1)<lmax(2)
    lmax1 = [lmax(1) lmax(2)];
else
    lmax1 = [lmax(2) lmax(1)];
end

sudutdoa = [lmax1(1) lmax1(2)];

%% korelasi silang (pengolahan sinyal di
penerima) (informasi jarak)

```

```

ns = 2*B*tover;% Nyquist theorem, USRP max. IQ
rate 50 MS/s
ts = tover/ns;% sampling time (s)
t = 0:ts:(tover-ts);% time data for time
domain plot
xt =
rxsda(1,:)+rxsda(1,:)+rxsda(1,:)+rxsda(1,:);

% coherent integration for received signal
rx_int_signal = zeros(1,ns);
s = 1;
for idx = 1:floor(length(xt)/ns)
    rx_int_signal = rx_int_signal +
xt(s:(idx*ns));
    s = s+ns;
end
np = idx;% number of pulses

TXBB = rxs(1,:) - mean(rxs(1,:));% zero mean
TXBB = rxs(1,:)/std(rxs(1,:));% unit variance

rx_int_signal = rx_int_signal -
mean(rx_int_signal(:));% zero mean
rx_int_signal =
rx_int_signal/std(rx_int_signal(:));% unit

[acor,lag] = xcorr(rx_int_signal(1:ns),TXBB);
jarak1 = 10*log10((abs(acor))/max(abs(acor)));

figure
det_range = lag*ts*3.0e8/2;
subplot(2,1,1)
plot(det_range,jarak1,'LineWidth',1.25)
xlim([0,tho*3*10^8/2])
grid
set(gca, 'FontSize', 11)
xlabel('Range (m)', 'FontSize', 13)

```

```

ylabel('Power (dBm)','FontSize',13)
title('\fontsize{14}Target Range')

figure
[dmax,rmax] = findpeaks(jarak1,det_range,
'MinPeakHeight',-5,'SortStr','descend');
findpeaks(jarak1,det_range,'MinPeakHeight',-5)
text(rmax+2.5, dmax,num2str((1:numel(dmax))))
grid on
xlim([0,tho*3*10^8/2])
ylim([-50 1])
xlabel('Range (m)','FontSize',13)
ylabel('Power (dBm)','FontSize',13)
title('\fontsize{14}Target Range')

rmax = sort(rmax,'ascend');
if length(rmax)<3
    rmax = [rmax(1) rmax(1)];
else
    rmax = rmax;
end

jarak = [rmax(1) rmax(2)];

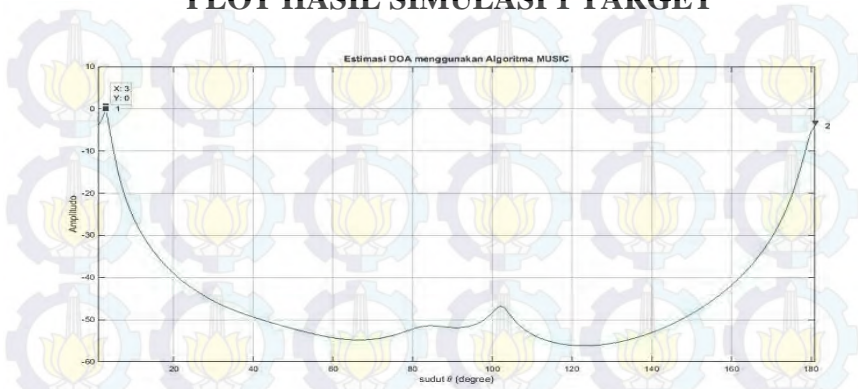
%% plot jarak vs sudut (display radar)
figure
scatter(sudutdoa,jarak,'filled')
xlim([0 180])
ylim([0 900])
grid on
xlabel('DOA(\theta)')
ylabel('jarak(m)')
title('deteksi target (jarak vs sudut)')

```

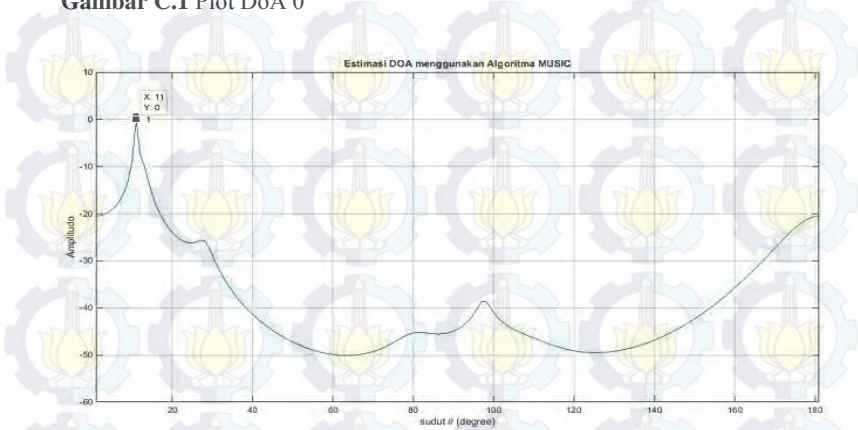



LAMPIRAN C

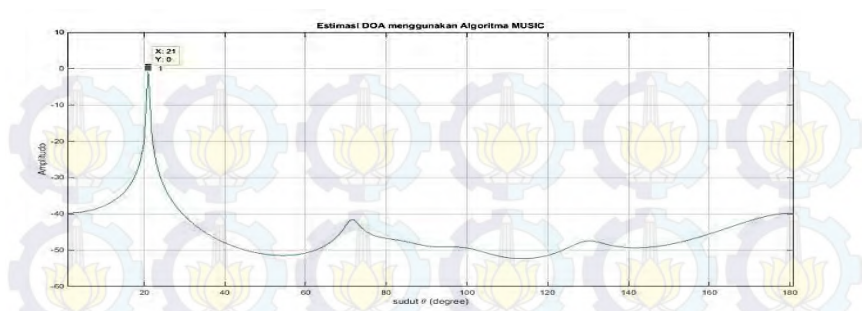
PLOT HASIL SIMULASI 1 TARGET



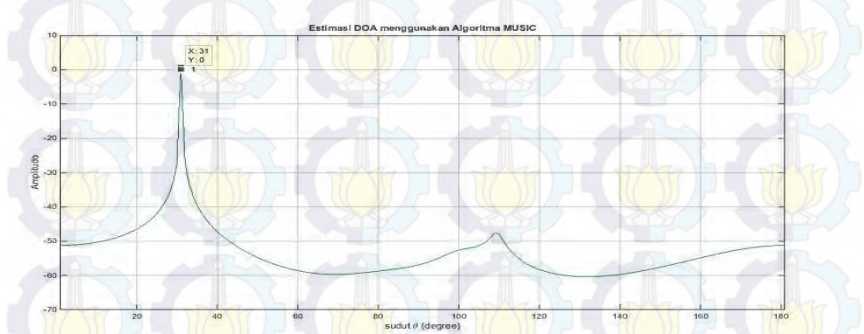
Gambar C.1 Plot DoA 0°



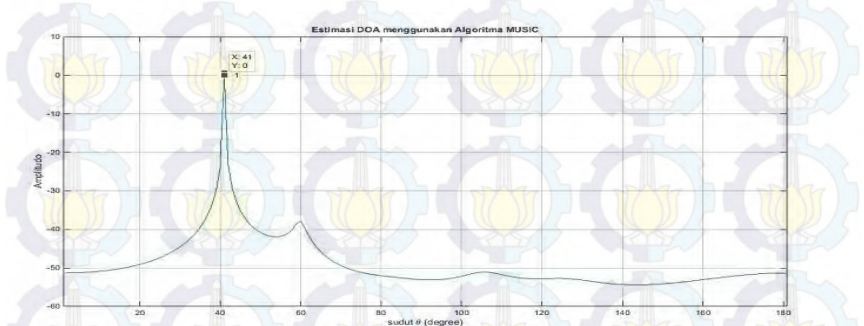
Gambar C.2 Plot DoA 10°



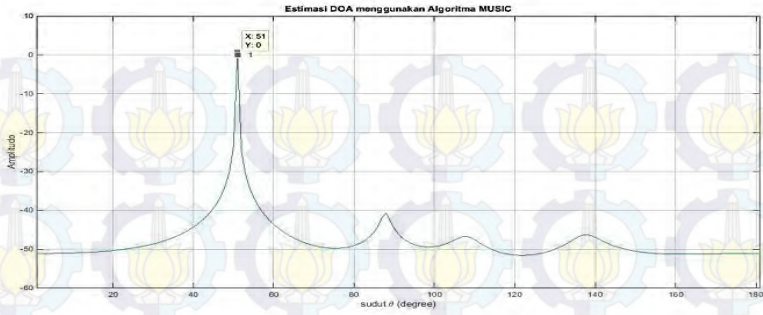
Gambar C.3 Plot DoA 20°



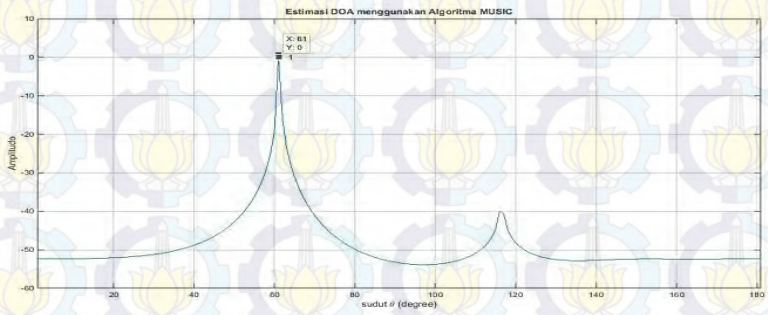
Gambar C.4 Plot DoA 30°



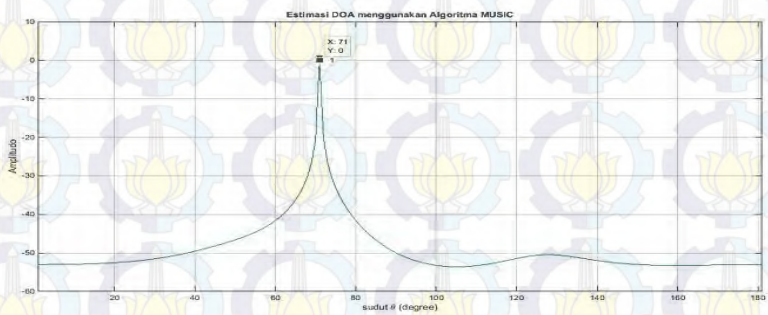
Gambar C.5 Plot DoA 40°



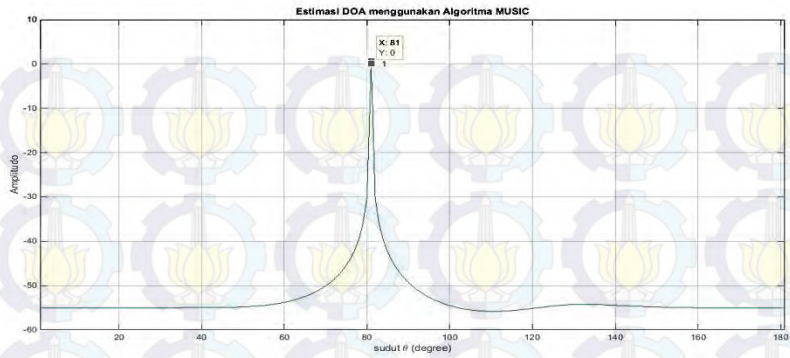
Gambar C.6 Plot DoA 50°



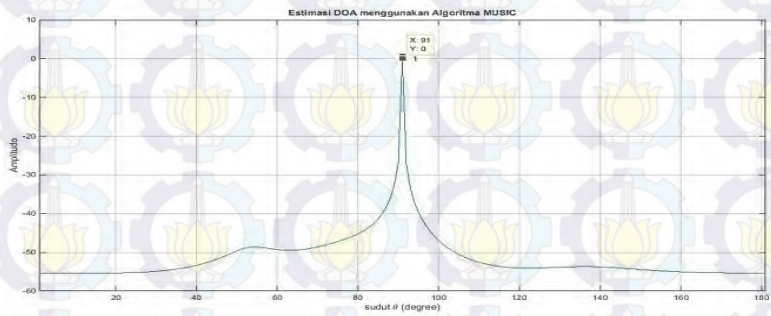
Gambar C.7 Plot DoA 60°



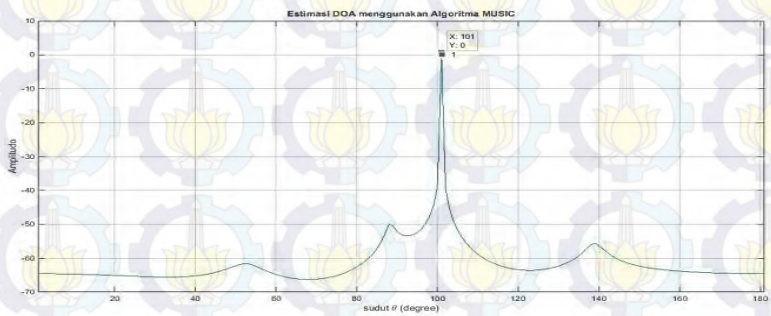
Gambar C.8 Plot DoA 70°



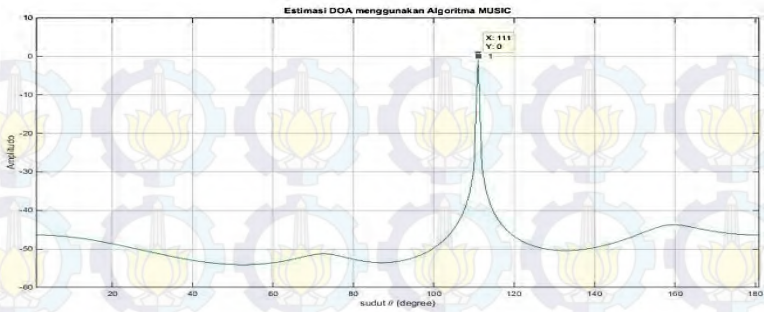
Gambar C.9 Plot DoA 80°



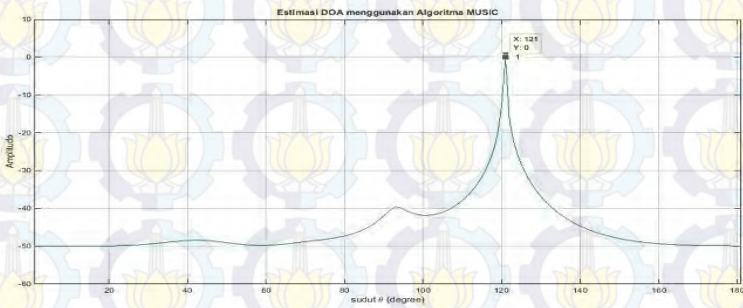
Gambar C.10 Plot DoA 90°



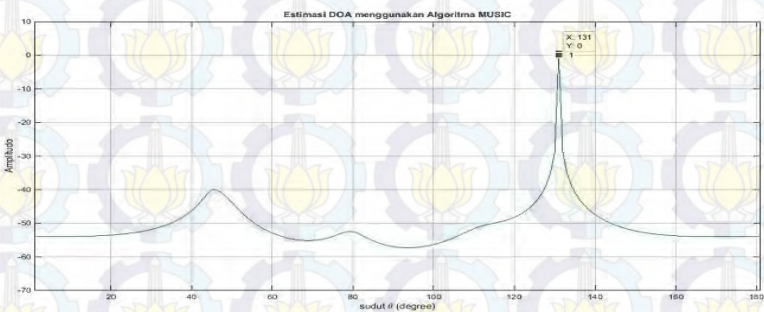
Gambar C.11 Plot DoA 100°



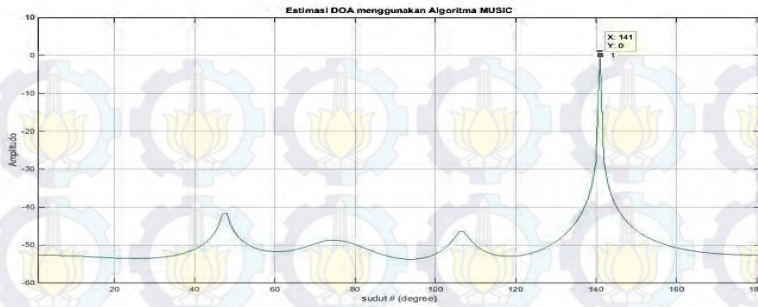
Gambar C.12 Plot DoA 110°



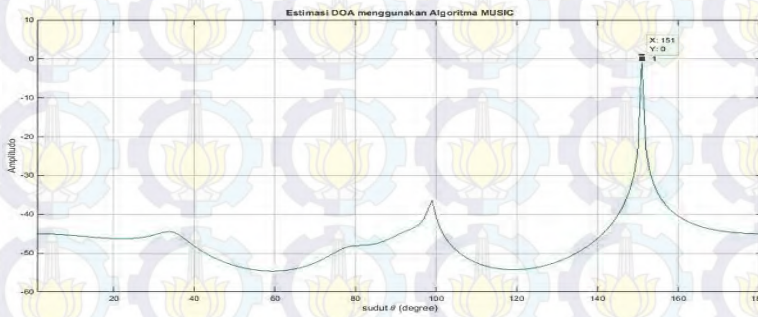
Gambar C.13 Plot DoA 120°



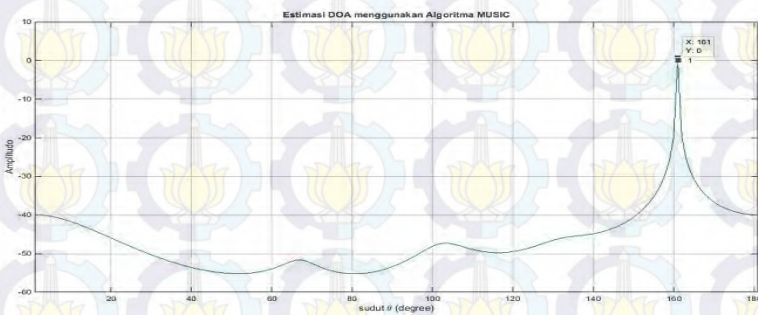
Gambar C.14 Plot DoA 130°



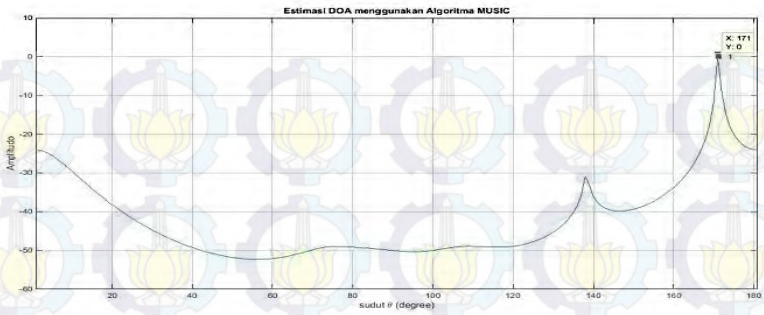
Gambar C.15 Plot DoA 140°



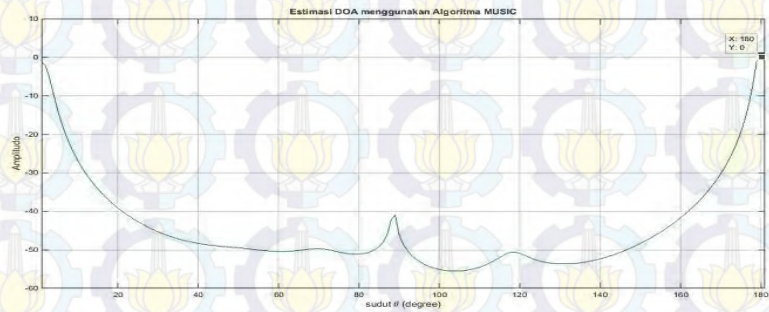
Gambar C.16 Plot DoA 150°



Gambar C.17 Plot DoA 160°



Gambar C.18 Plot DoA 170°



Gambar C.19 Plot DoA 180°



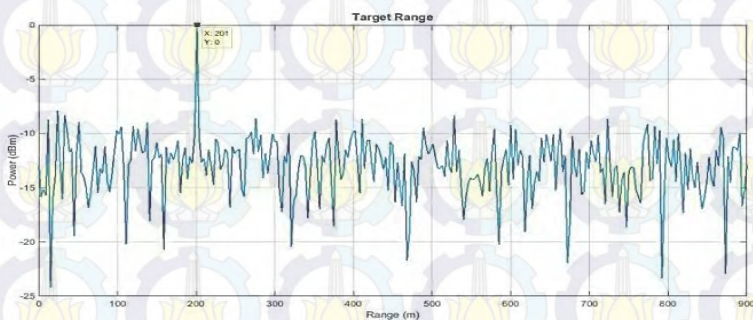
Gambar C.20 Plot Jarak 50m



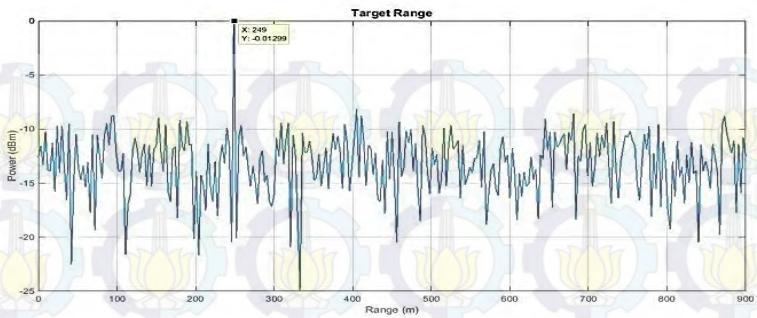
Gambar C.21 Plot Jarak 100m



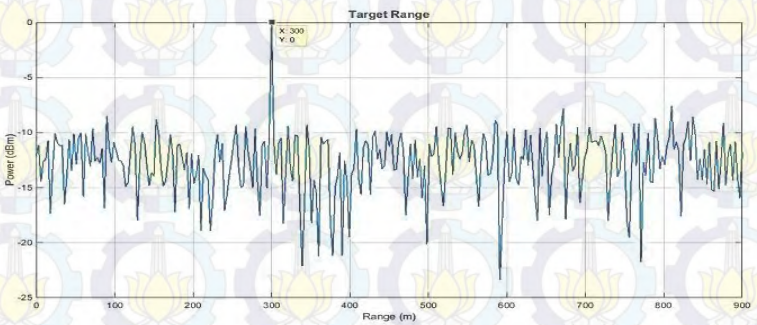
Gambar C.22 Plot Jarak 150m



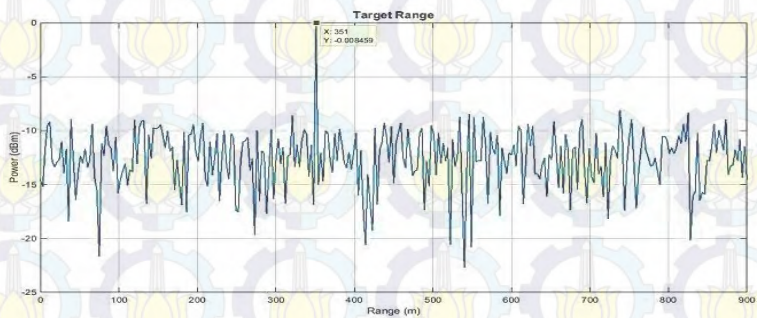
Gambar C.23 Plot Jarak 200m



Gambar C.24 Plot Jarak 250m



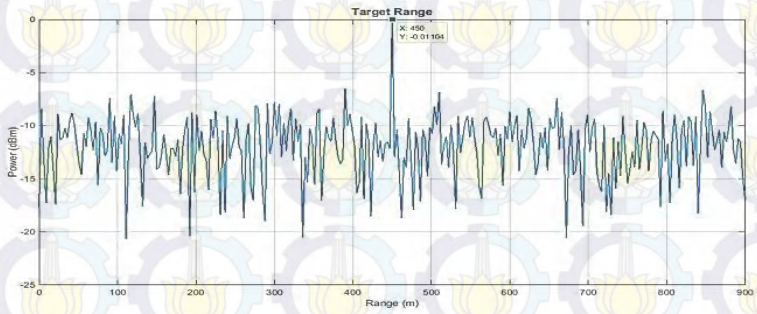
Gambar C.25 Plot Jarak 300m



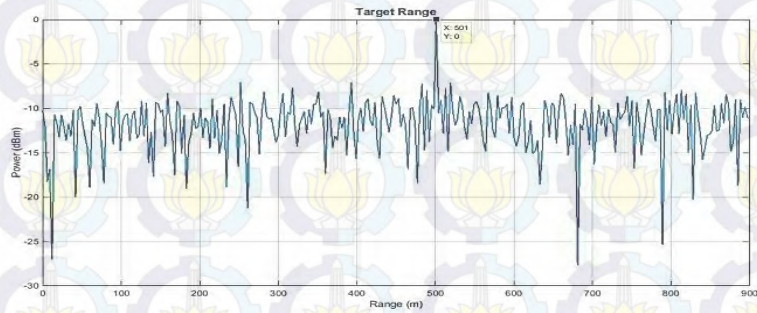
Gambar C.26 Plot Jarak 350m



Gambar C.27 Plot Jarak 400m



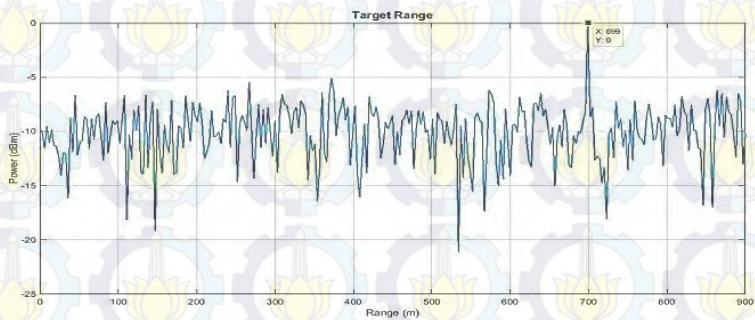
Gambar C.28 Plot Jarak 450m



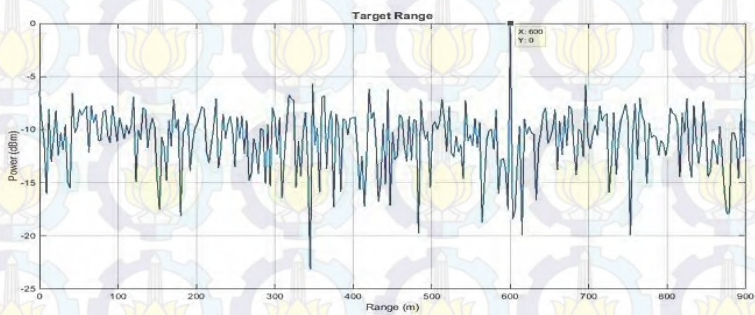
Gambar C.29 Plot Jarak 500m



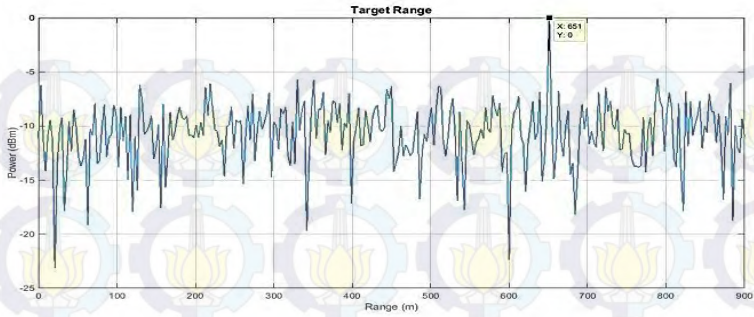
Gambar C.30 Plot Jarak 550m



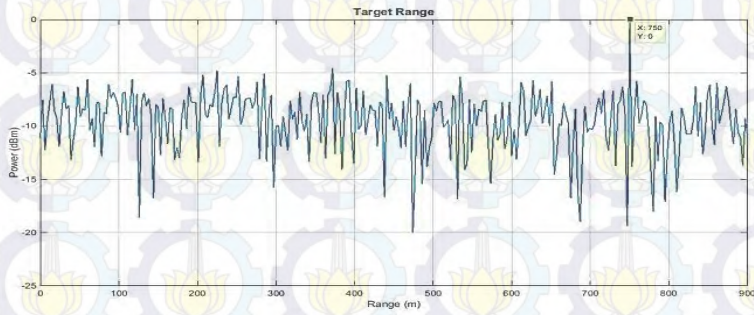
Gambar C.31 Plot Jarak 600m



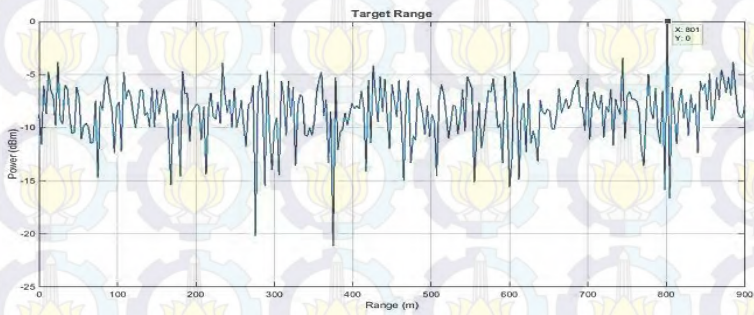
Gambar C.32 Plot Jarak 650m



Gambar C.33 Plot Jarak 700m



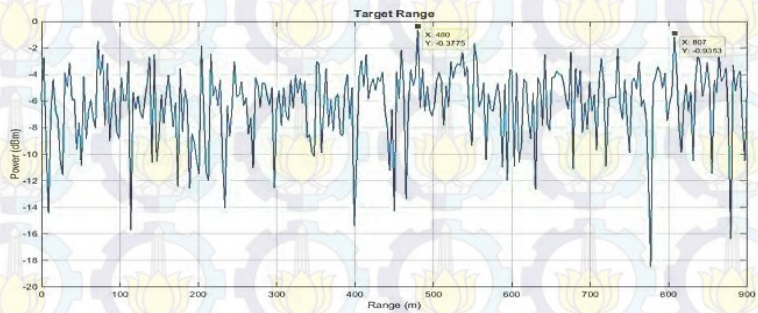
Gambar C.34 Plot Jarak 750m



Gambar C.35 Plot Jarak 800m



Gambar C.36 Plot Jarak 850m



Gambar C.37 Plot Jarak 900m



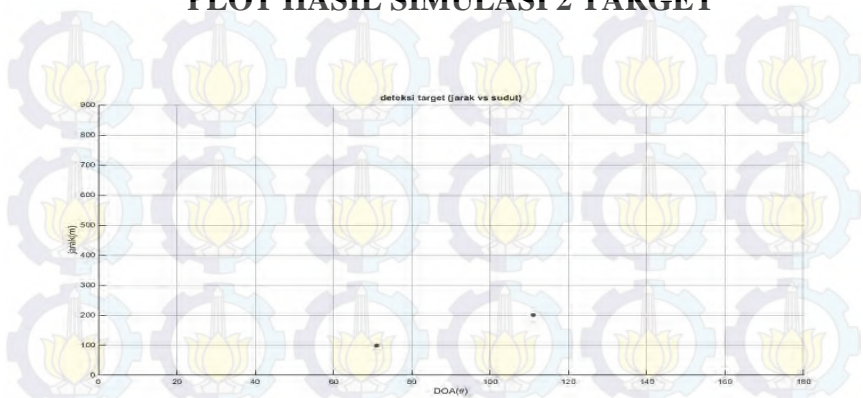
Gambar C.39 Plot Jarak Terjauh Target yang Bisa Dideteksi Radar



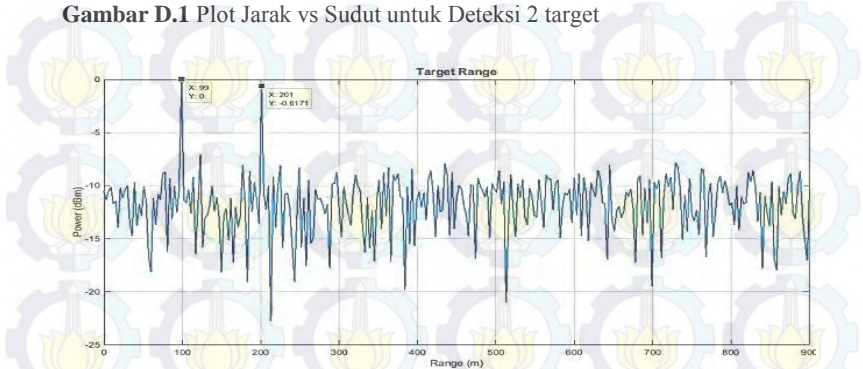
Gambar C.38 Plot Jarak Terdekat Target yang Bisa Dideteksi Radar

LAMPIRAN D

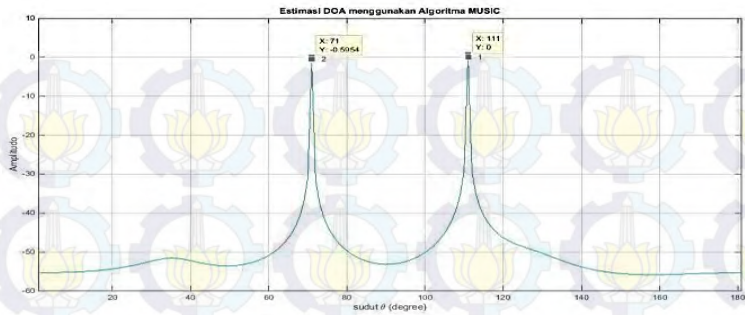
PLOT HASIL SIMULASI 2 TARGET



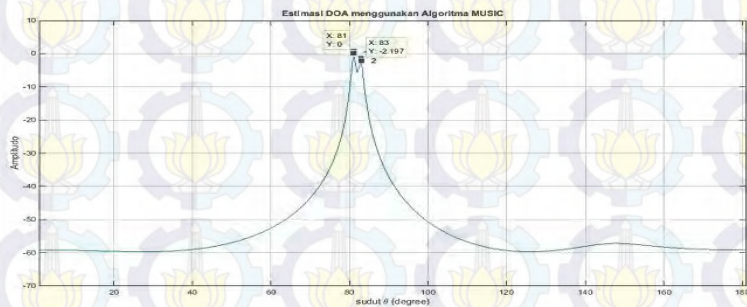
Gambar D.1 Plot Jarak vs Sudut untuk Deteksi 2 target



Gambar D.2 Plot Jarak untuk Deteksi 2 target



Gambar D.3 Plot Sudut untuk Deteksi 2 target



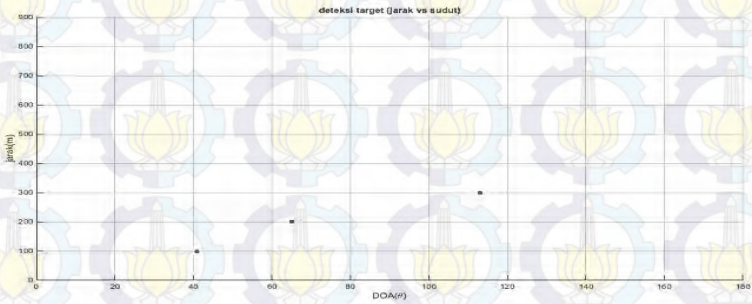
Gambar D.4 Plot Resolusi Sudut untuk Deteksi 2 target



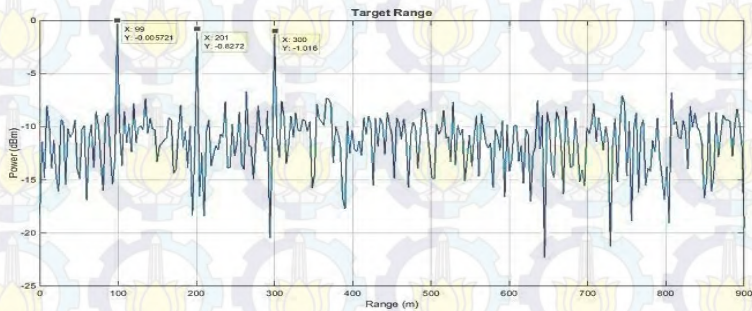
Gambar D.5 Plot Resolusi Jarak untuk Deteksi 2 target

LAMPIRAN E

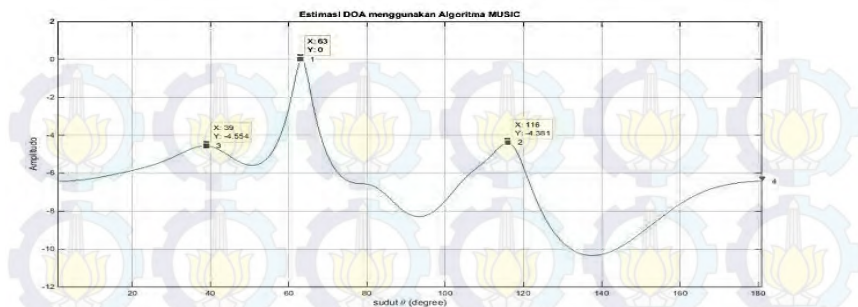
PLOT HASIL SIMULASI 3 TARGET



Gambar E.1 Plot Jarak vs Sudut untuk Deteksi 3 target



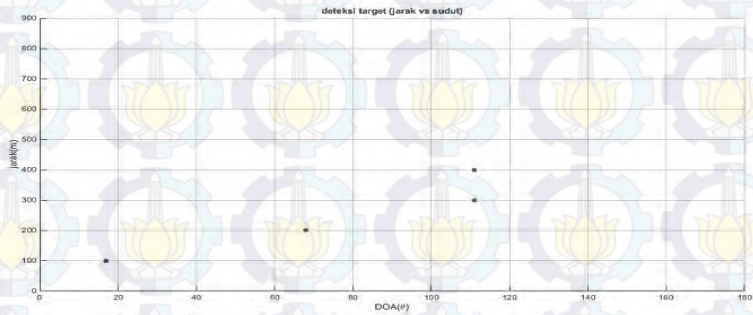
Gambar E.2 Plot Jarak untuk Deteksi 3 target



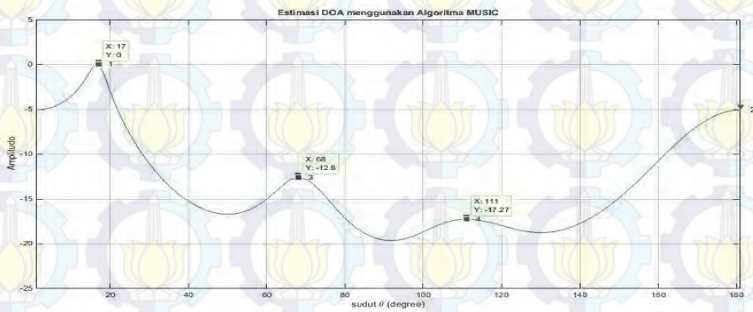
Gambar E.3 Plot Sudut untuk Deteksi 3 target

LAMPIRAN F

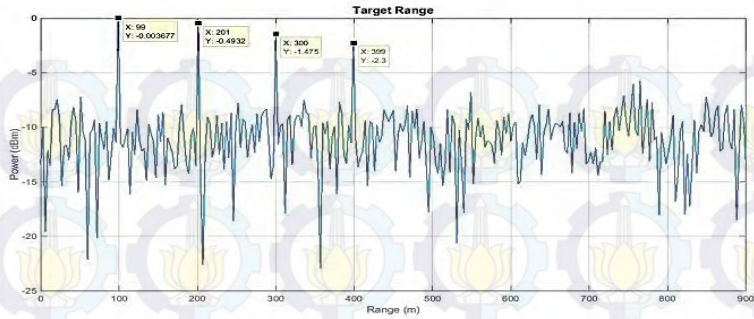
PLOT HASIL SIMULASI 4 TARGET



Gambar F.1 Plot Jarak vs Sudut untuk Deteksi 4 target



Gambar F.2 Plot Sudut untuk Deteksi 4 target



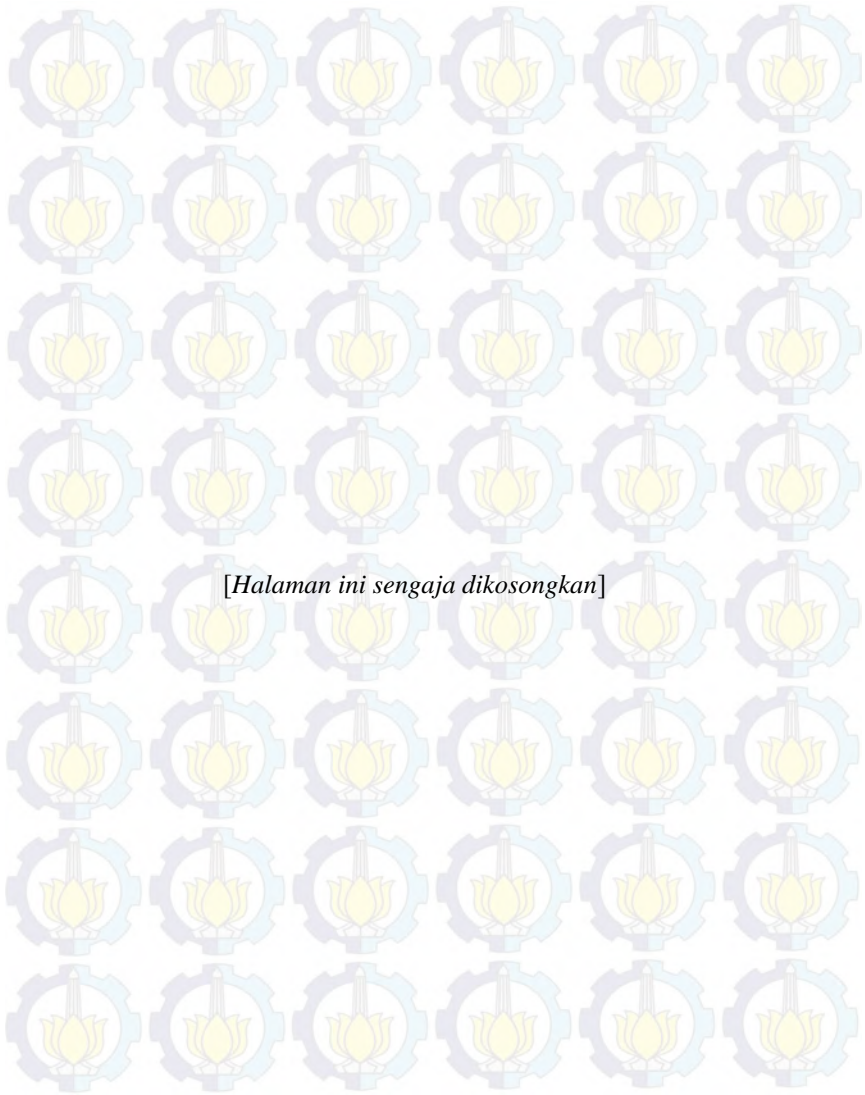
Gambar F.3 Plot Jarak untuk Deteksi 4 target



Gambar F.4 Plot Resolusi Jarak untuk Deteksi 4 target

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wiesbeck, W.: The Radar of The Future. Radar Conference (EuRAD), 2013 European, pp. 137 - 140
- [2] Li, J., Stoica, P.: MIMO Radar with Colocated Antennas. IEEE Signal Process. Mag., 2007, 24, pp. 106-114
- [3] Bassem R. Mahafza.: Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. 2005. Chapman & Hall.
- [4] Ali, F., Vossiek, M.: Detection of Weak Moving Targets Based on 2-D Range-Doppler FMCW Radar Fourier Processing. Institute of Electrical Information Technology, Clausthal University of Technology, Germany. 2010.
- [5] Skolnik, Merrill I.: Introduction to Radar System: Third Edition. 2001. The McGraw Hill Companies
- [6] Goldsmith, A.: Wireless Communications. 2004. Stanford University.
- [7] Wahab, Mashury., dkk.: Aplikasi Radar Fm-CW untuk Pengawasan Obyek Terbang pada Kawasan Wilayah Pantai. 2012. Prosidings InSINas
- [8] Melvin, William L., Scheer, James A.: Principles of Modern Radar : Advanced Techniques. 2013. Scitech Publishing
- [9] Gross, Frank : Smart Antennas for Wireless Communications with Matlab. 2005. McGraw-Hill
- [10] Scheer, James A., dkk.: Principles of Modern Radar : Basic Principles. 2010. Scitech Publishing
- [11] Curry, G. Richard: Radar Essential : Ch.08 Radar Measurement and Tracking. Scitech Publishing



BIODATA PENULIS



Rahardika Nur Permana, lahir di Banjarnegara, 15 Desember 1992. Memulai pendidikan formal di SDN 1 Purbalingga Lor, lalu SMPN 1 Purbalingga, dan SMAN 1 Purbalingga. Kemudian melanjutkan pendidikannya di Strata-1 (S1) program studi Telekomunikasi Multimedia, jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya sejak Juli 2011. Penulis aktif sebagai koordinator Divisi Jejaring dan Komunikasi, Yayasan BPW Center, Purbalingga sejak tahun 2012. Dan pada bulan Januari 2016 penulis melaksanakan Sidang Tugas Akhir sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana Teknik Elektro.

